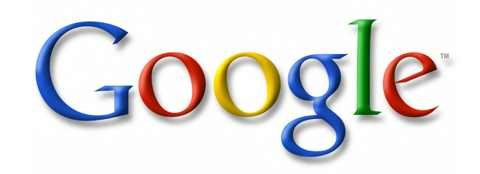
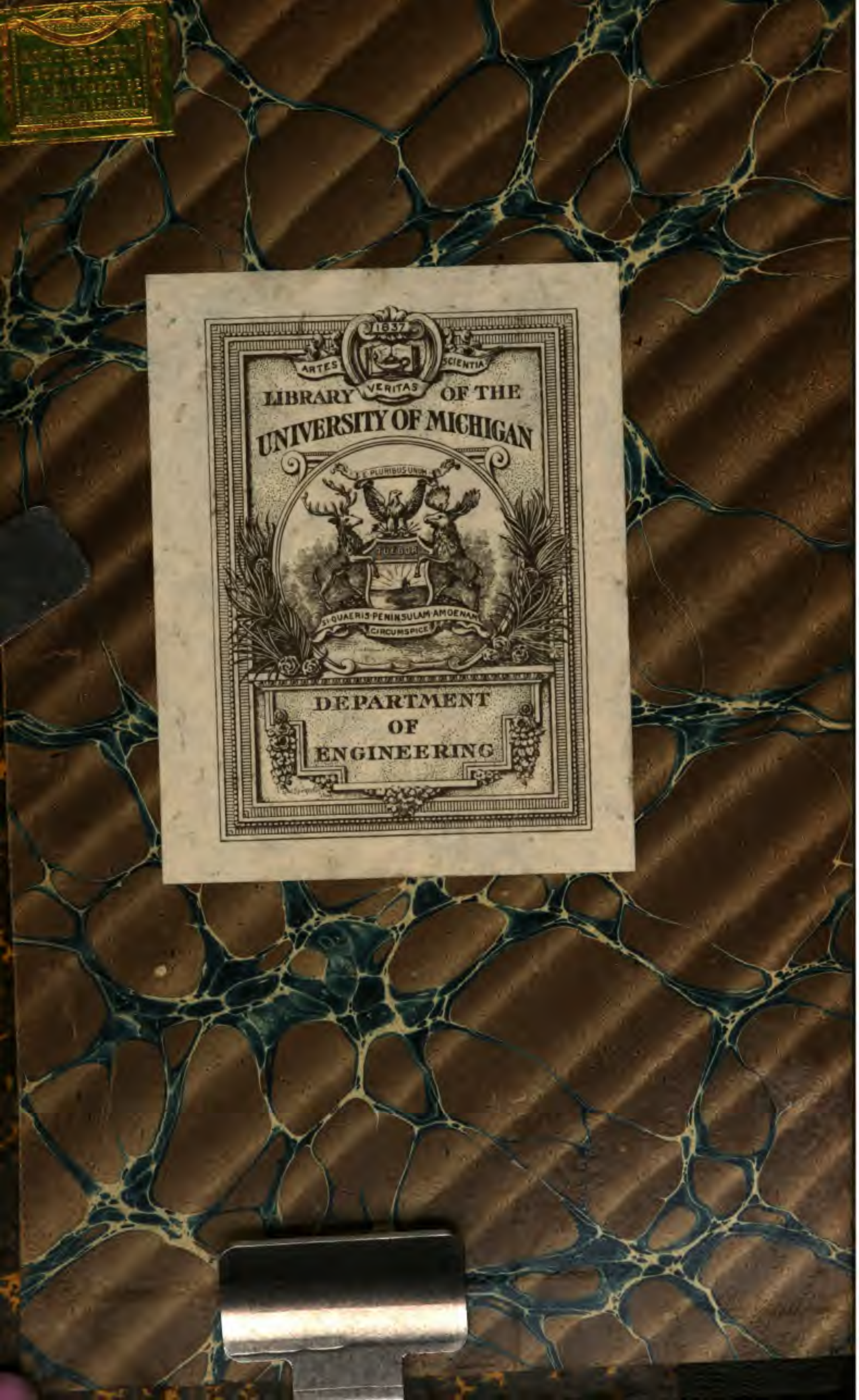



B 466095


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING



ÉTUDES SUR LA FONDERIE

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA RÉSISTANCE

ET LES PROPRIÉTÉS DIVERSES

DE LA FONTE MÉCANIQUE

DES FONTES TENACES, DOUCES ET TREMPÉES

PAR

Ed. DENY

INGÉNIEUR-DIRECTEUR DE L'USINE DE MERTZWILLER,
MEMBRE CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DE METZ ET DE L'ACADÉMIE DE STANISLAS, A NANCY,
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NATIONALE D'ARTS ET MÉTIERS DE CHALONS.

Extrait du *Bulletin technologique* (Nos 8 et 9. — 1886)
de la Société des Anciens Élèves
des Écoles nationales d'Arts et Métiers.

PARIS
E. BERNARD ET Cie, ÉDITEURS
RUE LACONDAMINE, 71

1886

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA RÉSISTANCE

ET LES PROPRIÉTÉS DIVERSES

DE LA FONTE MÉCANIQUE

DES FONTES TENACES DOUCES ET TREMPÉES

le moule la fonte liquide qui, en se solidifiant, reçoit la forme et les dimensions voulues. Comme travail mécanique, souvent, il ne reste plus que l'ébarbage des arêtes, le nettoyage des surfaces. La plupart des pièces fondues n'exigent pour être terminées qu'un léger travail d'ajustage ou de tour; ce procédé est si simple que l'on y a toujours recours, à moins que les circonstances ne le permettent pas ; et il est si économique que, quelque compliquée que soit une pièce, son prix de moulage ne sera jamais qu'une bien faible fraction de ce que coûterait la même pièce en fer.

C'est la résistance médiocre, bien connue, de la fonte ordinaire qui est cause de son rejet absolu dans certains cas, et dans d'autres cas, du préjudice que cette faible résistance apporte dans la construction, en donnant lieu à des dimensions exagérées, à des pièces très lourdes, sans proportion avec les pièces de fer qui les accompagnent. Mais que l'on parvienne à augmenter la résistance de ces fontes ordinaires, et immédiatement le cercle de leur emploi prendra de l'extension.

Anciennement, une grande partie des moulages était produite directement de fonte de première fusion présentant à la traction une résistance de 10 à 12 kg par millimètre carré de section, quand le fourneau était en bonne allure; mais pouvant s'abaisser jusque 8 kg et même en dessous, en mauvaise marche. Aujourd'hui, par suite de l'emploi de minerais de pays mélangés avec des minerais plus purs et plus riches que l'on fait venir d'assez grandes distances, la fonte produite a été notablement améliorée et l'on obtient assez facilement des fontes de première fusion résistant à un effort de traction de 14 à 15 kg par millimètre carré; mais cela seulement quand le roulement du fourneau est satisfaisant.

En raison des irrégularités d'allure qui se produisent dans la marche d'un haut fourneau, pour être plus certain d'ob-

tenir une fonte constamment de la qualité voulue, la plupart des fonderies ont renoncé à la première fusion et, malgré l'augmentation de prix qui en résulte, ne fabriquent plus de moulages qu'en seconde fusion.

Seulement ainsi, et par des mélanges appropriés et étudiés à l'avance d'une manière expérimentale, le fondeur peut arriver sans hésitation à obtenir couramment, sans risques de rebuts, la résistance et la régularité de fabrication qui lui sont demandées.

Ces chiffres de résistance de fonte: 14 à 15^{kg} par millimètre carré de section, que l'on obtient assez facilement dans les épreuves à la traction, ne sont encore qu'assez médiocres et depuis longtemps déjà ils ont été largement surpassés en Amérique d'abord, puis en Autriche et en Allemagne, au moyen de certains mélanges de fontes de ces pays riches en excellents minerais; mais ces mélanges que nous nous proposons de rechercher sont tenus aussi secrets que possible par les fonderies Gruson, à Buckau (Allemagne), et Ganz et Cie, à Ofen (Autriche), qui sont arrivées à produire, sous le nom de Hartguss, des fontes moulées d'une ténacité remarquable et qui, en même temps, sont susceptibles de prendre parfaitement la trempe en coquille.

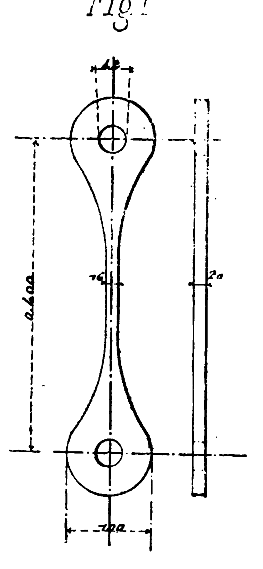
Même dans les cercles techniques, cette dernière propriété a donné lieu, pour ces fontes Hartguss, à une très grande confusion d'idées, parce que leur qualité la plus précieuse et la plus remarquable : leur résistance considérable, est demeurée méconnue et effacée par leur propriété secondaire de prendre la trempe lorsqu'elles sont coulées en coquille. Cela doit provenir de ce que la plupart des fonderies produisent sous le nom de Hartguss, avec des fontes ordinaires, des moulages trempés en coquille ne présentant aucune résistance et ne pouvant que discréditer ce produit au lieu d'en étendre l'emploi, tandis que la première fabrique de fonte tenace, en Allemagne, celle de Gruson, comprend

indifféremment sous le nom de Hartguss, aussi bien les moulages coulés en coquille que ceux que l'on coule en sable vert, ou étuvés, avec des mélanges spéciaux de fontes.

La fonte Hartguss (désignation que nous traduisons par tenace) est une fonte moyennement carburée, renfermant du manganèse, peu de silicium, du soufre et du phosphore à l'état de traces seulement; il est presque impossible de la définir par la proportion des éléments qu'elle contient, parce que, comme toutes les fontes, c'est un métal essentiellement hétérogène renfermant, outre le fer et le carbone qui la constituent, une foule d'éléments étrangers ayant par leur proportion relative la plus grande influence sur les propriétés mécaniques de ce métal. Il suffit qu'un ou plusieurs de ces éléments étrangers soient omis dans une analyse de fonte pour que l'analyse ne puisse plus conduire, avec quelque certitude, à aucune conclusion pratique sur la valeur de cette fonte, à moins que les principaux éléments trouvés ne se rencontrent en très grande proportion. D'ailleurs, une analyse rigoureuse de fonte est aussi laborieuse que difficile à obtenir et ne peut être bien faite que par un chimiste longuement exercé à ce genre de recherches. En général, les moyens d'investigation par l'analyse ne peuvent conduire qu'à des données vagues, incertaines, contradictoires même, sur la résistance d'une fonte donnée, par suite de l'action réciproque des divers éléments étrangers, en proportion si variable, que renferment les fontes. Les essais directs et mécaniques à la traction, au choc, à la flexion, la mesure de la douceur, du retrait sont bien autrement concluants et seront toujours le meilleur critérium des qualités d'une fonte de moulage, en même temps que les plus immédiats et les plus faciles à exécuter dans une fonderie, pour comparer les fontes entre elles et juger de la façon dont se comportera une fonte donnée, dans une application déterminée.

Avant d'entrer dans la discussion des résultats d'épreuves des fontes dont il sera question plus loin, prenons connaissance des conditions d'essais auxquelles elles furent soumises.

1° *Essai à la traction.* — Cette épreuve a été effectuée sur barrettes ayant la forme et les dimensions indiquées par le croquis ci-contre *(fig. 1)*. Ces barrettes, comme du reste toutes les autres nous ayant servi aux épreuves, ont été coulées debout, avec masselotte et dans des moules étuvés (1).



Dans un barreau d'essai coulé horizontalement, les différentes sections horizontales ne sont pas homogènes, la surface supérieure du barreau est moins saine et moins dense que la surface inférieure, de sorte que pendant l'épreuve, ce qui a été la surface supérieure dans le moule doit céder à l'effort de traction avant la surface qui occupait la partie inférieure; et comme l'allongement élastique de la fonte est très minime, dès qu'une partie du barreau cède à l'effort, la rupture totale du barreau se produit; l'autre partie étant pour ainsi dire arrachée par un tirage en porte-à-faux. Donc, quand les sections transversales d'un barreau d'essai, en fonte, ne

(1) Il est important, pour obtenir des résultats à peu près uniformes et donnant le chiffre maximum de résistance d'une fonte, que les barreaux d'essai soient coulés debout, avec masselotte et dans des moules parfaitement séchés, afin d'éviter des soufflures à l'intérieur de ces barreaux et les obtenir sains. Par l'emploi d'une masselotte située directement à la partie supérieure de l'éprouvette, le sable qui peut se détacher du moule pendant le remoulage ou la coulée, les scories dont les fontes sont toujours plus ou moins imprégnées, l'air entraîné par la fonte liquide pendant le remplissage du moule et les gaz se dégageant de la fonte

sont pas rendues parfaitement homogènes par la disposition verticale de ce barreau dans le moule, pendant sa coulée, l'épreuve ne peut donner rigoureusement la résistance absolue de la fonte qui le constitue.

De plus, il faut que les moules de ces éprouvettes soient convenablement étuvés et parfaitement secs à la surface, pour que, si la fonte essayée a la propriété de prendre la trempe quand son refroidissement est rapide, cette trempe qui diminue toujours plus ou moins la résistance de la fonte, ne puisse se produire au contact du sable humide, soit par la vaporisation de l'humidité du moule, soit par la décomposition de la vapeur produite.

L'amoindrissement de résistance, au contact du sable humide d'un moule, se produit même sur les fontes ne prenant pas la trempe, ce qui doit être probablement attribué à la solidification rapide de la fonte par suite de laquelle les gaz et les laitiers qu'elle renferme ne peuvent se dégager assez librement pour s'élever et se rendre dans la masselotte.

Voici deux exemples de diminution de la résistance de la fonte, suivant qu'elle est coulée en sable étuvé et refroidie lentement, ou coulée en coquille et refroidie brusquement.

Dans un essai à la flexion sur 4 barreaux carrés de 40/40 m/m de section, en *fonte grise* serrée, dont 2 pièces ont été coulées en sable étuvé et les 2 autres en coquille, de la même poche de fonte liquide, on a obtenu pour résistance moyenne des 2 barreaux coulés en sable : $R = 24^{kg}6$ par millimètre carré

---

pendant sa solidification, s'élèvent par leur légèreté relative avant la solidification pâteuse de la fonte et viennent s'accumuler dans la masselotte, purifiant ainsi mécaniquement le métal situé en dessous. Dans plusieurs essais comparatifs que je fis sur des barreaux coulés de la même fonte, les uns horizontalement, les autres verticalement, j'ai toujours trouvé une différence considérable, pouvant s'élever jusqu'à 30 0/0 entre les résultats de résistance obtenus sur ces barreaux, quoique les barreaux coulés horizontalement aient été munis de masselotte à leurs extrémités.

(cassure grise à grains serrés) et pour résistance moyenne des 2 barreaux coulés en coquille : R = 18^{kg}8 par millimètre carré (cassure truitée), soit, dans ce dernier cas, une perte de résistance de 24 0/0.

Dans un autre essai à la flexion sur 4 barreaux carrés de 40/40 $^m/_m$ de section, en *fonte truitée* grise, dont 2 barreaux furent coulés en sable étuvé et les 2 autres en coquille, de la même poche de fonte liquide, la résistance moyenne trouvée fut : R = 25^{kg}6 par millimètre carré (cassure truitée grise) pour les premiers, et R = 19^{kg}1 par millimètre carré (cassure blanche) pour les seconds, soit encore une perte de résistance de 25,5 0/0, pour ces derniers.

Dans l'essai au choc des deux barreaux en *fonte grise* serrée, les barreaux coulés en sable furent rompus par 0^{m}40 l'un et 0^{m}37 l'autre, de hauteur de chute d'un boulet de 12^{kg}, tandis que les 2 barreaux de cette même fonte coulée en coquille furent rompus par une hauteur de chute de 0^{m}25, soit une perte moyenne de 35 0/0 de la résistance au choc.

Les 2 barreaux en *fonte truitée* grise, coulés en sable, ne furent rompus que par une hauteur de chute de 0^{m}45, tandis que les 2 barreaux de même fonte coulés en coquille furent cassés par une hauteur de chute de 0^{m}27 l'un et 0^{m}30 l'autre, soit encore une perte moyenne de résistance au choc de 36,8 0/0.

De plus, pour obtenir des barreaux d'épreuves sains, c'est-à-dire mécaniquement purifiés du sable, laitier, air, etc, qui ont pu se mêler à la fonte liquide et être entraînés dans le moule, il est nécessaire que la fonte soit coulée très fluide et par conséquent très chaude, et non presque à l'état pâteux.

Les expériences suivantes vont encore nous le prouver : Un barreau carré, d'épreuve à la flexion, de 40/40 $^m/_m$ de section, en fonte grise, coulé très chaud, en sable étuvé, a donné pour résistance à la flexion R = 24^{kg}7 par millimètre carré et

la même fonte coulée très chaude, en coquille, a fourni un barreau carré de 40/40m/m de section présentant une résistance à la flexion R = 17kg8; ces deux éprouvettes provenant d'une même poche de fonte. Laissant ensuite l'excédent de fonte contenu dans la poche s'y refroidir jusqu'à parvenir à peu près à sa limite de fluidité, deux autres barreaux de 40/40m/m de section furent coulés, l'un dans un moule en sable étuvé, l'autre en coquille. Le barreau coulé en sable présenta une résistance à la flexion de R = 17kg7 par millimètre carré, et le barreau coulé en coquille ne donna comme résistance à la flexion que R = 15kg par millimètre carré : d'où une perte de résistance de la fonte froide sur la fonte chaude de 28,5 0/0 pour la coulée en sable étuvé et de 15,3 0/0 pour la coulée en coquille.

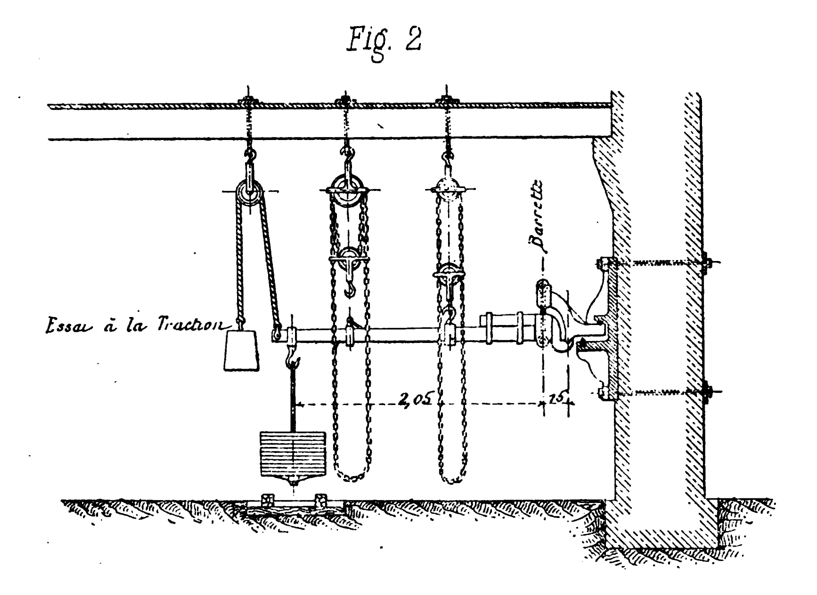
Aux essais par le choc, des différences presque aussi importantes se produisirent; tandis que le barreau coulé en sable avec fonte très chaude fut rompu par une hauteur de chute de 0m32, le barreau coulé en sable avec fonte froide fut cassé par 0m27 de hauteur de chute, soit une perte de 16 0/0 dans la résistance; et tandis que le barreau coulé en coquille, avec fonte très chaude, ne fut rompu que par 0m27 de hauteur de chute du boulet, le barreau coulé en coquille, avec fonte froide, fut cassé sous une hauteur de chute de 0m22, soit une déperdition de résistance de 18,5 0/0 résultant de la différence de fluidité de la fonte.

Comme on le voit, tous ces écarts de résistance sont loin d'être négligeables et l'on ne saurait apporter trop d'attention dans la coulée de pièces exigeant une grande résistance; et, bien que je n'aie pas fait dans des conditions pareilles d'épreuves à la traction, parce que les barrettes, à cause de leur forme, eussent été arrachées par leur retrait, dans la coulée en coquille, il n'est guère douteux que des différences semblables ne se fussent produites.

Dans nos épreuves, pour que les fontes essayées soient

pures de tout mélange avec d'autres fontes, ce qui est difficile à obtenir quand la fonte est liquéfiée au cubilot, ces fontes ont été mises en fusion au four à creuset, en opérant sur 30^{kg} environ, pris dans les différentes parties des fontes à essayer et coulant avec ces 30^{kg} : 2 barrettes d'épreuve à la traction, 2 barreaux d'épreuve au choc et à la flexion, et, avec le restant, une masselotte en coquille.

Fig. 2



Les chiffres trouvés et que nous donnerons plus loin, après avoir rapidement passé en revue les diverses propriétés des fontes, sont la moyenne des résultats obtenus sur chacun des deux barreaux coulés avec la même fonte.

Pour les essais à la traction, j'ai employé l'appareil Monge, en le modifiant comme le montre le croquis *fig. 2*.

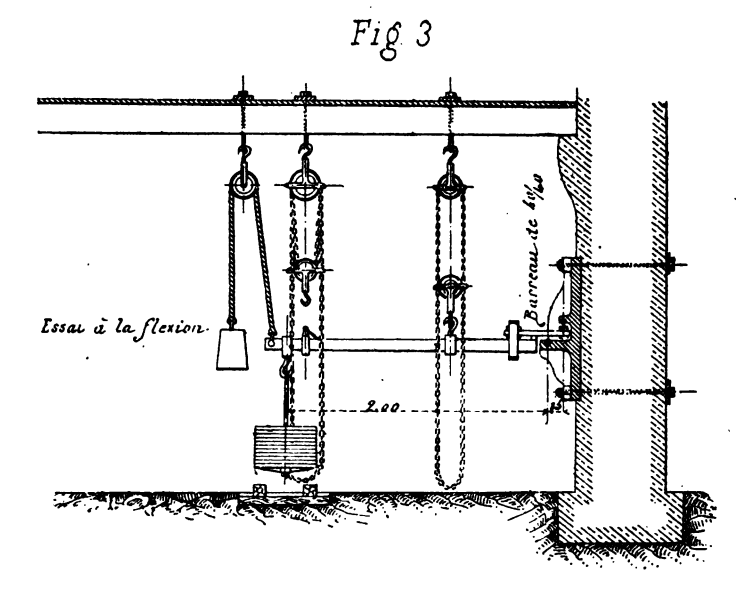
2° *Essai à la flexion.* — Les essais à la flexion se firent également à l'appareil Monge disposé ainsi que l'indique le cro-

quis *fig. 3*, et sur barreaux carrés de 40/40 m/m de section (1) coulés debout, avec masselotte et dans des moules étuvés.

Dans les tableaux donnant le résultat de ces épreuves de rupture par flexion, le chiffre mentionné est la valeur de R par millimètre carré, tirée de la formule

$$M = R\frac{I}{v'} = \frac{RC^3}{6} = PL$$

Fig 3



dans laquelle C est le côté du barreau, PL est le moment de l'effort de flexion ayant déterminé la rupture du barreau essayé. Comme ce barreau de 40 m/m de côté donne :

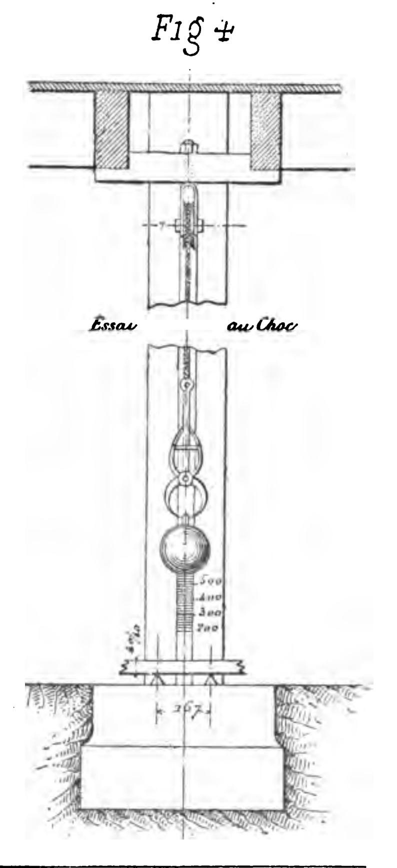
$$C^3 = \overline{40}^3 = 64,000$$

(1) Généralement ces essais à la flexion se font sur barreaux carrés de 80/80 m/m ; mais tenant à avoir 2 barreaux d'épreuve pour chacune des fontes essayées, et limité par la contenance 30 ks des creusets dont je pouvais disposer, je dus m'en tenir à des barreaux de 40/40 m/m qui me servirent à la fois à essayer ces différentes fontes à la flexion et au choc, dans des épreuves successives.

et que le bras du levier de l'appareil employé est de 2^m, on a :

$$R = \frac{6PL}{C^3} = \frac{6P \times 2^m000}{64000} = 0,1875P.$$

3° *Essai au choc.* — Les essais au choc furent produits sur barreaux de $40/40^m/^m$ provenant du plus long fragment des barreaux de $40/40^m/^m$ cassés dans les épreuves précédentes à la flexion, et se firent à l'aide d'un boulet de 12^{kg} tombant des hauteurs successives : 0^m20, 0^m22, 0^m25, 0^m27, 0^m30, 0^m32, 0^m35, 0^m37, 0^m40, 0^m42, 0^m45, 0^m47, 0^m50, etc., sur le barreau carré disposé horizontalement sur deux couteaux espacés de 0^m167. Ces couteaux sont venus de fonte avec une chabotte rectangulaire, dont le poids est de 300^{kg} environ (1), reposant sur une couche de sable de très grande épaisseur *(fig. 4)*.



Tels sont, en résumé, avec les recherches sur la résistance présentée par la fonte aux efforts d'écrasement, recherches n'ayant qu'une importance secondaire pour

(1) Le poids de la chabotte, par rapport à celui de la masse produisant le choc, est important à considérer dans les essais au choc ; plus est faible le rapport du poids de la chabotte à celui de la masse choquante, plus

les fontes que nous avons en vue, les seuls moyens d'investigation que l'on emploie à peu près généralement pour se rendre compte des propriétés mécaniques des fontes. Cependant, ces recherches de résistance sont loin de montrer une fonte sous tous ses aspects, et telle fonte ordinaire, de mauvaise qualité, qu'un atelier devra rejeter comme impropre au travail, pourra donner des résistances à la traction, à la flexion, au choc, ou à la compression, supérieures à celles que donne une bonne fonte, facile à travailler. Il y a donc encore d'autres éléments à considérer dans la fonte pour apprécier dans leur ensemble toutes les qualités ou les défauts de ce métal.

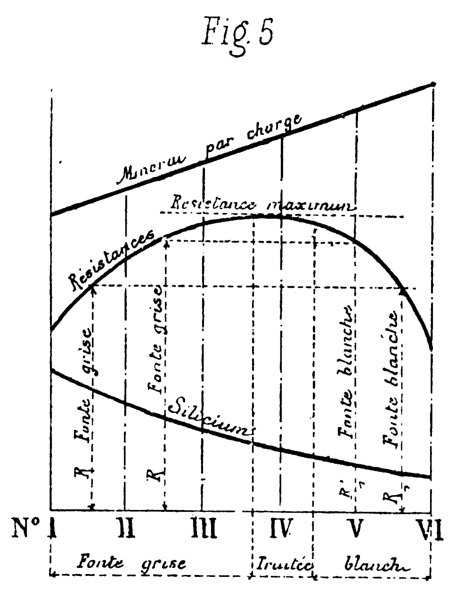
Si, en effet, dans un haut fourneau traitant un minerai de nature quelconque, à l'aide d'un combustible aussi quelconque, on fait varier la charge de minerai (demeurant de même nature), en l'augmentant de plus en plus, tout en laissant la charge de combustible constante, on produira successivement tous les numéros de fonte depuis I jusqu'à VI de la classification habituelle :

N° I. — Fonte noire à gros grains parsemés de lamelles de graphite,
N° II. — Fonte noire mélangée de grains gros et fins,
N° III. — Fonte grise à grains fins,
N° IV. — Fonte truitée,
N° V. — Fonte blanche lamelleuse,
N° VI. — Fonte blanche grenue,

et si l'on prend (*fig. 5*) 6 ordonnées équidistantes pour représenter chacun de ces numéros de fonte, que l'on porte sur chacune de ces ordonnées les résistances à la traction,

s'élève la hauteur de chute déterminant la rupture du barreau soumis à l'épreuve. Aussi ne doit-on pas être surpris des résistances au choc que nous avons trouvées et que souvent on rencontre supérieures dans les fontes tout à fait ordinaires, quand le poids de la chabotte est minime.

au choc, ou à la flexion correspondant à chacun de ces numéros; en général, la courbe représentative de ces résistances, obtenue en réunissant l'extrémité des ordonnées, sera convexe et tournera sa concavité vers l'axe d'abscisses en montant, presque toujours, que le maximum de résistance de ces fontes diverses, provenant de minerai de même nature, est à peu près donné par la fonte n° IV qui est à cassure truitée. Depuis le n° I jusqu'au n° V, la proportion de carbone total, contenu pour cent dans la fonte, varie souvent très peu; elle est un peu plus élevée dans le n° I que dans les autres numéros; mais c'est la proportion relative du carbone graphitique au carbone dissous dans la fonte qui varie surtout. Dans le n° I, presque tout le carbone contenu dans la fonte y est à l'état graphitique (1) et l'on ne rencontre que très peu de carbone combiné, ou dissous; dans le n° II, le carbone graphitique diminue et le carbone combiné s'élève; dans le n° III, le carbone graphitique diminue encore pendant que s'élève presque d'autant le carbone combiné; dans le n° IV, le carbone graphitique et le carbone combiné sont pres-



(1) Les fontes n° I trop chargées de graphite prennent mal l'empreinte des moules et produisent des pièces à surface généralement limailleuses.

que en même proportion; dans le n° V, le carbone graphitique disparaît pour ne laisser à sa place que du carbone combiné; et dans le n° VI, tout le carbone contenu est encore à l'état combiné, mais en proportion totale plus faible que dans les autres numéros de fonte. Or, suivant qu'une fonte provenant de mêmes minerais contient plus ou moins de carbone graphitique, elle est plus ou moins tendre, plus ou moins douce à travailler; plus elle renferme de carbone combiné, plus elle devient dure et difficile à attaquer soit à la lime, soit par un outil quelconque.

Revenant à la courbe des résistances représentée *fig. 5*, entre le maximum et le minimum, nous pouvons trouver pour chacune des résistances intermédiaires deux fontes très différentes et présentant des résistances égales : $R = R_1$, $R' = R'_1$, etc. ; et cependant si ces fontes ne sont données que par les épreuves mécaniques qu'elles devront pouvoir supporter, elle seront équivalentes ; la fonte claire, ou même blanche, obtenue avec une moindre charge relative de combustible dans le haut fourneau, reviendra à un prix moindre que son équivalente la fonte plus grise ; et cette fonte claire, si elle ne peut être employée brute de fonderie, sera un métal excessivement difficile à travailler.

Donc, à résistance égale, la question de dureté ou de douceur d'une fonte ne peut être négligée pour les pièces de fonderie ayant à subir un travail d'ajustage quelque peu important; de deux fontes données, d'égale résistance, ce sera celle dont la douceur sous la lime sera la plus grande, qui donnera un prix de revient minimum d'ajustage et sera préférée.

Toutefois, il ne faut pas tomber dans l'excès contraire, ainsi que cela arrive trop souvent, c'est-à-dire qu'il ne convient pas, pour obtenir un travail plus facile d'ajustage, de sacrifier la résistance d'une fonte à sa douceur, puisque nous avons vu qu'en général ce sont, parmi les fontes grises, précisément les fontes les plus douces, les plus graphiteuses, qui présentent la moindre résistance.

Étant donné à produire une pièce très résistante, suivant que cette pièce devra subir un travail d'ajustage plus ou moins important, on devra l'obtenir en s'approchant plus ou moins de la fonte à cassure truitée, qui donne le maximum de résistance ; et l'on pourra d'autant plus s'approcher de cette fonte, que le travail d'ajustage pourra être fait soit aux machines à raboter, à mortaiser, au tour, etc., soit à la meule, le travail à ces machines s'opérant, même sur un métal dur, à moins de frais que le simple travail à la lime.

Mais, toutes les fontes de même numéro, quoique présentant à peu près une cassure de même couleur, sont loin d'offrir le même degré de résistance. C'est ici qu'interviennent les différents corps tels que le silicium, le phosphore, le manganèse, le soufre, etc., toujours contenus avec le carbone et en proportion variable dans les fontes, et que la nature des minerais ayant servi à produire ces fontes a une réelle importance par les corps étrangers qu'ils contiennent (1). Ceux-ci étant plus ou moins facilement réductibles, dans le haut fourneau, augmentent ou diminuent, suivant leur nature et leur proportion relative, la résistance des fontes, leur dureté, en facilitant ou entravant la combinaison du carbone avec la fonte.

Ainsi le silicium, en proportion notable, diminue la proportion de carbone combiné jusqu'à la réduire à zéro ; par suite, il adoucit les fontes, mais diminue leur résistance (2) ;

---

(1) Tandis que la teneur des fontes de moulage, en carbone, varie de 2,75 à 5 0/0, la teneur en silicium peut varier de 0,2 à 5 0/0, proportion rarement dépassée ; la teneur en phosphore peut varier depuis des traces jusqu'à 2 0/0 rarement dépassée ; la teneur en maganèse peut varier depuis des traces jusqu'à 3 0/0 rarement dépassée ; la teneur en soufre, chrome, tungstène, aluminium, etc., reste généralement à l'état de traces. On voit donc quelle diversité de propriétés peut présenter cette série de composés.

(2) M. Janoyer, directeur des hauts fourneaux de Vierzon, qui s'est beaucoup occupé des fontes silicieuses, citant un cas particulier de production d'une fonte qui, à l'analyse, donnait de 7 à 9 0/0 de silicium, dit

dans des fontes provenant de même minerai, la fonte la plus graphiteuse est généralement celle qui contient la plus forte proportion de silicium, à cause de la température élevée nécessaire à la production de cette fonte très grise, dans le haut-fourneau, et qui favorise également la réduction d'une partie de la silice contenue dans le lit de fusion.

Aussi, les fontes produites à l'air chaud renferment-elles plus de silicium que celles provenant des mêmes minerais et qui sont obtenues à l'air froid, ce qui fait que généralement les fontes à l'air froid sont plus résistantes que celles à l'air chaud, bien que ces dernières donnent des cassures d'aspect plus uniforme, plus beau.

Pour une même teneur en carbone, la fonte qui renferme le plus de silicium blanchit moins, coulée en coquille, et paraît toujours plus noire; sa principale propriété est donc d'atténuer la faculté de trempe, de l'annuler même dans les fontes à 3 ou 3 1/2 0/0 de carbone, quand la teneur s'élève à 3 ou 3 1/2 0/0 silicium.

A la dose de 0,2 à 0,3 0/0, le phosphore paraît n'avoir qu'une très faible influence sur la résistance des fontes; mais à la dose de 1 à 2 0/0, il les rend fragiles et les durcit.

Le manganèse à dose moyenne et jusqu'à environ 2,5 0/0 paraît avoir une influence marquée sur la résistance des fontes, qu'il augmente, probablement parce qu'étant très oxydable, il entraîne dans la scorie très fluide qu'il forme une partie du silicium et du soufre contenus avec lui dans la fonte. A l'inverse du silicium, il favorise la dissolution du carbone dans les fontes, augmente leur faculté de trempe et les

---

en parlant de cette fonte : « Elle était encore chaude et très fluide, apte au moulage de poterie très mince; le moindre choc la brisait et la cassure était brillante, sans grains, unie comme la porcelaine, il n'y avait pas trace de graphite. Une de ses propriétés les plus remarquables était sa mollesse, elle se laissait entamer au couteau. Comme fonte de moulage, c'était un produit détestable.

blanchit. Passé une certaine proportion, variable avec celle des autres éléments étrangers qui l'accompagnent dans la fonte, il diminue de plus en plus la résistance de cette fonte, la durcit, puis la rend cristalline, lamelleuse et spéculaire.

Enfin, le soufre, qui ne se rencontre que rarement à dose un peu importante dans les fontes grises de moulage, lui donne un grain cendré et terne, rend la fonte caverneuse, dure, sèche et fragile, piquée à sa surface, ce qui l'amène à être presque absolument impropre au moulage.

Ce sont là les généralités acquises sur les principaux corps se rencontrant le plus communément dans les fontes. Bien d'autres corps existent encore fréquemment, mais le plus souvent à l'état de traces et leur action, bien difficile à démêler, est le plus souvent effacée par celle des autres corps étrangers précédemment cités et coexistant dans les fontes en plus forte proportion.

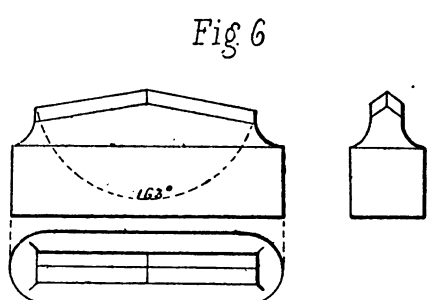
En définitive, la dureté ou la douceur d'une fonte de numéro donné, comme sa résistance, est excessivement variable et ne peut être appréciée que par des essais directs, analogues à ceux qu'on lui fait subir pour déterminer sa résistance aux différents genres d'efforts auxquels elle peut être soumise; et l'on doit être surpris que dans les ateliers importants, où l'on a à travailler de grandes quantités de fonte mécanique, on s'en tienne pour juger de la douceur de ces fontes au seul indice donné par l'aspect plus ou moins gris de leur cassure, et que l'on ne possède aucun moyen rigoureux d'essai permettant de contrôler cet indice trompeur et de mesurer les divers degrés de dureté ou de douceur de la fonte employée.

Pour la comparaison de la dureté relative des divers métaux (1), le colonel Rosset a proposé l'emploi d'un couteau, en acier

(1) *Les métaux à l'Exposition universelle de 1878*, par M. H. Lebasteur, p. 170.

trempé, ayant une forme spéciale et bien déterminée. Un parallélipipède, taillé dans le métal que l'on veut étudier, est soumis, dans une machine disposée pour la compression, à l'action de ce couteau; lorsqu'on exerce la compression, le couteau pénètre dans le métal et, de la longueur de l'entaille sous un effort déterminé, on déduit le degré relatif de la dureté de ce métal.

Le couteau employé dans les épreuves de dureté est fait en forme de pyramide quadrangulaire (à base rhomboïdale) dont les angles sont 163° et 90°, il est représenté par le croquis ci-contre (*fig. 6*).



Pour comparer entre elles les duretés, on part de cette base, qu'elles sont inversement proportionnelles au volume de l'entaille produite par l'impression du couteau; ce principe est admis dans les épreuves américaines.

Pour établir l'échelle de dureté pour les métaux plus durs que le cuivre, on opère de la manière suivante : le cuivre laminé au point correspondant à celui employé pour mesurer la pression intérieure des canons, avec le mesureur Rodman, reçoit du couteau précité une entaille de 30 m/m de longueur; sous une pression de 3850kg, l'entaille produite a un volume de 50 m/mc.

Cette entaille a été prise pour le zéro de la dureté, puis on a admis que la plus grande dureté de l'acier trempé le plus dur, ne se laissant pas entailler, était de 10.

On a ensuite calculé les longueurs d'entailles correspondant à des volumes graduellement croissants de 1/2 en 1/2 milli-

mètre cube, et chaque série de 5 $^m/_m$ forme un degré de dureté qui est divisé à son tour en 10 parties. On a de cette façon obtenu une échelle de dureté, suivant laquelle on peut classer les métaux soumis aux expériences.

Or, si cet essai, quelque peu subtil et n'intéressant que la surface du métal, peut s'appliquer à des métaux absolument homogènes et d'égale dureté à leur surface et dans toute leur épaisseur, il ne saurait convenir avec une exactitude suffisante à la fonte dont la dureté superficielle est toujours très élevée et plus considérable que celle de l'intérieur. Avec les fontes claires, la pénétration du couteau serait presque nulle et par suite l'appréciation du degré de dureté correspondant à une entaille aussi minime devrait être fort délicate; avec les fontes blanches, souvent plus dures que l'acier, l'arête vive du couteau s'émousserait et l'entaille obtenue serait absolument nulle; par conséquent la recherche de leur degré de dureté par ce moyen serait impossible. Cependant il peut y avoir intérêt à connaître le degré de dureté d'une fonte blanche ou trempée en coquille, telle que celle des cylindres cannelés de meunerie, des cylindres de laminoirs à tôles, que l'on doit pouvoir tourner, ou celle de toute autre pièce trempée en coquille, dont l'ajustage devrait être fait à la meule, ou qui, dans son emploi, serait soumise à l'usure par frottement.

L'emploi d'une meule en grès ou en émeri, capable d'attaquer une fonte, si dure qu'elle soit et aussi profondément qu'on le veut, me paraît être plus rationnel et bien plus pratique que celui d'un couteau en acier, pour déterminer la dureté ou la douceur des fontes, pour comparer la douceur des fontes entre elles et établir leur échelle de dureté. L'emploi de la meule est plus rationnel, parce que l'usure de la fonte sur la meule se rapproche plus de l'attaque de ce métal par la lime ou un outil quelconque, dans l'ajustage, et par conséquent permet, mieux que par la grandeur de l'empreinte laissée dans sa surface par un couteau, d'apprécier la facilité

plus ou moins grande que l'on rencontrera dans le travail d'ajustage de cette fonte, ou son usure plus ou moins considérable et rapide, si elle est appliquée à des pièces glissantes devant s'user par frottement.

La meule est d'un emploi plus pratique dans ce genre de recherches, parce que tous les ateliers en sont pourvus, que l'on peut soumettre la fonte pendant une durée aussi longue qu'on le voudra à l'usure de la meule et obtenir une quantité considérable de métal enlevé, quantité facile à mesurer et permettant d'obtenir une échelle de dureté avec des écarts très appréciables d'un degré au degré suivant.

Pour que les épreuves de dureté exécutées à la meule soient comparables entre elles, il faut évidemment pouvoir les réaliser dans des conditions identiques; or les facteurs du travail de frottement

$$T = f.n\pi d.P,$$

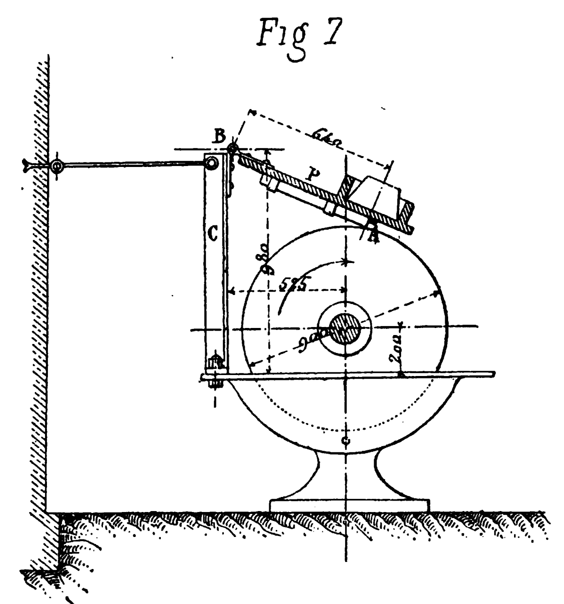
dans ces essais, sont : 1° le coefficient de frottement f qui doit varier avec la nature de la meule employée, sa dureté plus ou moins grande, sa finesse de grains, l'arrosage plus ou moins abondant de la surface frottante; 2° le chemin parcouru dans le frottement : $n.\pi d$, ou le produit du nombre de tours de la meule, correspondant à chacun des essais, par la circonférence de cette meule; 3° la charge P sous laquelle se produit le frottement de la fonte sur la meule; 4° l'étendue de la surface de fonte soumise à l'usure.

Si, dans ces essais, tous les différents facteurs demeuraient constants, l'usure produite sur la fonte essayée ou le nombre de millimètres cubes enlevés par usure pourrait servir de terme de comparaison pour classer par degré de dureté ou de douceur toutes les différentes fontes éprouvées ; or, de tous ces facteurs divers, le premier f, relatif au coefficient de frottement, est le seul que l'on ne puisse rendre constant d'une meule à une autre.

Pour tourner cette difficulté, il suffit de choisir une fonte

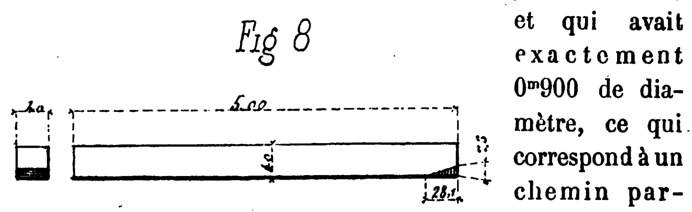
type, la fonte Coltness n° I par exemple, qui est la plus douce et la plus constante de celles que l'on trouve dans le plus grand nombre des fonderies, de couler avec cette fonte pure des barreaux d'essai que l'on emploiera comme types et de rapporter à l'usure de ces barreaux, produite sur la meule quelconque que l'on utilisera aux épreuves de fontes, l'usure produite par la même meule sur les fontes éprouvées dans des conditions identiques.

Ainsi, pour nos épreuves de douceur des fontes, nous avons employé la disposition figurée sur le croquis ci-contre (*fig. 7*) : des barreaux de fonte de 40/40 m/m de section, les mêmes qui, ensuite, ont servi aux épreuves à la flexion et au choc, ont été passés entre deux brides fixées sous une planchette P jusqu'à butter exactement contre l'arrêt A. La planchette P était attachée à l'aide d'une charnière B au montant C, fixé par son pied au bac de la meule et à sa partie supérieure relié au mur par un tirant, de telle façon que le point B soit absolument fixe, malgré l'entraînement que tend à lui communiquer la meule pendant le frottement



du barreau. Le dessus de la planchette P portait une espèce de boîte dans laquelle entrait exactement un poids de 20kg; ainsi disposé, le barreau d'essai portait sur la meule par une de ses arêtes de 40 m/m, la charge sur cette arête était de 25kg (charge produite par le poids de 20kg placé dans la boîte, une partie du bois de la planchette et du barreau d'essai) et l'usure se produisait suivant un prisme à section triangulaire, de 40 m/m de long, et dont les côtés de la base étaient faciles à mesurer *(fig. 8)*.

Après 220 tours (1) de la meule en grès dont je me suis servi, et qui avait exactement 0m900 de diamètre, ce qui correspond à un chemin parcouru de :



$$220^t \times 0^m9 \times 3{,}1416 = 622^m$$

pendant le frottement, l'usure du barreau de Coltness n° I fut de :

$$\frac{28^{m}/^{m}\,1 \times 7^{m}/^{m}\,3}{2} \times 40^{m}/^{m} = 4102\ ^{m}/^{m3}.$$

Si, comme il doit être possible de l'admettre, la douceur d'une fonte est proportionnelle au volume de métal enlevé par la meule dans ces conditions, en attribuant le coefficient 10 pour degré de douceur à la fonte Coltness n° I qui, de toutes les fontes, peut être considérée comme la plus douce à travailler, on pourra former une échelle de comparaison pour la douceur des autres fontes, en considérant une usure de

$$\frac{4102^{m}/^{m3}}{10} = 410^{m}/^{m3}$$

comme correspondant au degré de douceur, et attribuant

(1) Ce nombre de tours correspondait à 5 minutes de durée de l'essai de chaque barreau.

aux autres fontes éprouvées d'une manière identique, sur la même meule et pendant le même nombre de tours, un coefficient de degré de douceur donné par le quotient obtenu en divisant le volume de métal enlevé sur ces fontes par 410 m/m³.

En résumé, cet essai revient à user par frottement sur une meule en grès ou en émeri un certain volume V de fonte Coltness n° I, sous une charge de frottement quelconque, à compter le nombre de tours de la meule correspondant à l'enlèvement de cette quantité de métal, pour appliquer ensuite ce même nombre de tours, de la même meule, aux essais des autres fontes, opérés sous la même charge de frottement, à mesurer les quantités V_1, V'_2, etc. de métal enlevé à ces autres fontes pour un travail de frottement qui ainsi devient égal, et à prendre comme degré de douceur le rapport

$$V_1 : \frac{V}{10}, \quad V_2 : \frac{V}{10}, \text{ etc. des volumes } V_1, V_2, \text{ etc.}$$

de fonte enlevée dans les épreuves, au dixième du volume V de fonte enlevée dans les mêmes conditions à la fonte Coltness n° I choisie comme type.

De la sorte, en évitant dans ces essais la difficulté de rencontrer des meules de nature identique, on peut cependant obtenir des résultats comparables entre eux, non seulement dans une même fonderie, mais dans des ateliers quelconques, employant ou non des meules de même nature, pourvu que le point de comparaison soit ramené à l'usure d'une fonte douce et constante et qu'on puisse la trouver partout.

La classification du degré de douceur des fontes proposée précédemment contient 10 numéros qui, en général, seront suffisants; on pourrait la simplifier encore, tout en la rendant plus claire, en appelant :

Fontes douces, celles qui dans cette classification sont comprises des . . . . n°s 8 à 10.

Fontes demi-douces, celles comprises des — 6 à 8.

Fontes demi-dures, celles comprises des nos 4 à 6,
Fontes dures . . . . — 2 à 4,
Fontes très dures . . . . — 0 à 2,

ce qui correspond assez exactement aux qualifications que l'on rencontre en pratique.

Une autre propriété des fontes, trop souvent négligée par les constructeurs, est le retrait ou contraction des fontes dans les moules. En effet, ce retrait est variable et en général d'autant plus grand que les fontes sont moins riches en carbone, parce que ce retrait se prend par la fonte depuis son point de solidification jusqu'à son complet refroidissement et que la température de solidification est d'autant plus élevée que, toute autre chose égale, la fonte renferme moins de carbone.

Le retrait peut varier de 8 à 22 m/m par mètre ; plus il est élevé, plus on doit craindre la torsion, le voilement des pièces d'inégale épaisseur et quelquefois leur arrachement dans le raccordement ou la jonction des parties minces avec les parties épaisses, quand cette jonction se fait à angles vifs ; ou même encore, dans les pièces d'égale épaisseur, quand les parties d'une même pièce se raccordent à angle droit.

Ces ruptures ne sont pas toujours visibles, souvent elles se déclarent brusquement dans un choc, parfois elles ne s'ouvrent que peu à peu ; mais visibles ou non, elles n'en altèrent pas moins profondément la résistance des pièces.

Dans les pièces d'inégale épaisseur, les parties les plus minces et présentant une surface relativement plus grande que les parties plus massives, se refroidissent plus rapidement dans le moule que ces dernières ; par suite, les parties minces prennent sur les parties épaisses une avance dans le retrait déterminant une tension générale ; et pour peu que cette avance soit contrariée, soit par la conformation de la pièce, soit par le moule trop dur et incompressible, il doit s'ensuivre une rupture du métal dans l'endroit où l'avance est

maximum, ou, pour le moins, un gauchissement de la pièce.

Les mouleurs cherchent bien à éviter ces effets en enlevant le sable, un peu après la coulée, dans les parties de moules ne se prêtant pas au retrait de la fonte, ou en mettant à l'air, pour refroidir plus rapidement, les parties massives; mais ce ne sont là que des palliatifs dont l'efficacité est souvent en défaut dans les pièces importantes et longues, quand le retrait de la fonte est élevé (1).

C'est le retrait considérable (18 à 22 m/m par mètre) de la fonte malléable et de l'acier fondu qui constitue l'une des principales difficultés de fabrication de ces moulages, dès que l'on doit produire des pièces n'ayant pas une épaisseur uniforme, ou des pièces creuses moulées à l'aide de noyaux, ou encore des pièces dont certaines parties se raccordent à angle droit et à angles vifs. En effet, sitôt que la surface de ces pièces ou que le volume des noyaux devient quelque peu considérable, comme les moules et les noyaux doivent être parfaitement séchés pour éviter les bouillonnements et les soufflures que déterminerait l'humidité du sable devenu presque incompressible, ces moules, ni les noyaux ne permettent pas un retrait aussi étendu que le comporte le métal, les pièces sortent plus ou moins arrachées des moules, même lorsque l'on prend la précaution de les retirer aussitôt que ce métal a fait prise, pour les placer dans un four chauffé au rouge, et de les laisser refroidir uniformément et avec lenteur. Il arrive encore fréquemment, pour certaines formes de pièces engagées de toutes parts par des saillies dans le sable du moule, que pour retirer

(1) Un modèle mal conçu compromettant la solidité d'une pièce et rendant même parfois sa réussite impossible, l'ingénieur ne doit pas, dans l'établissement des modèles, s'abandonner à toute sa fantaisie de conception; il doit se rendre compte du retrait du métal employé, s'assurer qu'il peut s'opérer facilement, chercher autant que possible l'uniformité des épaisseurs et éviter les angles vifs, pour être certain de ne pas trouver des pièces déchirées ou gercées dans les angles, ou tendues et gauchies dans certaines de leurs parties.

ces pièces à temps, on en perd un certain nombre, parce que les saillies trop chaudes encore en certaines places se brisent en les dégageant.

Une bonne fonte de moulage, propre à la fabrication de toutes formes de pièces, ne doit pas prendre plus de 12 à 13 m/m de retrait par mètre; quand ce retrait atteint 15 m/m, cette fonte devient inacceptable pour les pièces longues, à fortes saillies, ou à évidements de grande longueur, surtout lorsque ces pièces doivent être coulées dans des moules séchés et que dans leurs différentes parties elles présentent de grandes différences d'épaisseur raccordées à angles plus ou moins vifs.

A mesure que le retrait s'élève au-dessus de 13 à 15 m/m par mètre, les fontes exigent que l'on prenne de plus nombreuses et plus grandes précautions dans le moulage pour éviter les ruptures par retrait. L'emploi de ces fontes qui donnerait lieu aux mêmes difficultés que l'acier, sans en avoir la même valeur, doit être restreint de plus en plus; elles ne produiraient que des pièces excessivement tendues dans leurs différentes parties et susceptibles de rompre au moindre choc, à moins que ces moulages ne soient de faible longueur, qu'ils n'offrent que de légères saillies ou qu'ils ne soient coulés dans des moules non séchés et compressibles.

Du reste, on ne rencontre guère ces grands retraits que dans les fontes blanches qui, à part leur emploi dans les colonnes, les contrepoids, n'ont qu'une utilisation très minime en fonderie.

En dehors du retrait, les fontes subissent encore, après leur coulée dans les moules, une contraction moléculaire ou tassement d'autant plus prononcé que les pièces sont plus massives; ce tassement qui, très probablement, ne doit provenir que du retrait de la fonte pendant son état liquide et sans doute aussi des gaz (air, vapeur d'eau décomposée) que la fonte absorbe pendant sa fusion et sa coulée et qui s'en dégagent pendant sa solidification, a l'inconvénient de donner lieu

à des cavités situées au centre des pièces massives, vers la partie supérieure, et par suite, de s'opposer à la production de pièces compactes et bien saines.

C'est surtout dans les cylindres à tôles de fort diamètre que l'on peut rencontrer, quand un tourillon casse, des exemples remarquables de tassement produisant de larges et profondes cavités à parois cristallines et friables, formées d'aiguilles arborescentes, comme les fougères, disposées en chevrons plus ou moins enchevêtrés les uns dans les autres. Ces cristallisations seraient très belles pour tout autre que le fondeur ou le maître de forges auquel appartiennent ces cylindres.

La forme et la grandeur des cavités de tassement sont en corrélation avec la forme et le volume de la partie massive des pièces, avec la nature de la fonte et son refroidissement plus ou moins uniforme dans le moule; plus est faible la teneur en carbone des fontes, plus leur température à l'état liquide est élevée et plus grandes sont les cavités de tassement, par suite du retrait plus considérable dû à un écart de température plus grand entre la température de coulée des pièces et la température de solidification de la fonte. Ces cavités sont à leur maximum dans les lingots d'acier fondu où il n'est pas rare de les voir s'étendre jusqu'au delà du quart de leur hauteur et c'est encore là une des grandes difficultés que l'on a à vaincre dans la fabrication des moulages en acier.

Ces cavités de contraction du métal s'expliquent aisément; le refroidissement et le durcissement (conséquence du refroidissement par les parois) commencent par les couches avoisinant les parties inférieures des moules et s'étendent assez promptement à tout le métal en contact avec les parois de ces moules, et d'autant plus rapidement, que le refroidissement par ce contact est plus accéléré par l'humidité que le métal rencontre, ou par la conductibilité des parois, comme dans la coulée en coquille.

Le métal des couches supérieures, sous l'épiderme solidifié au contact du moule, descend tant qu'il trouve un passage

ouvert pour nourrir et remplacer à mesure le vide laissé par le retrait des couches inférieures et latérales qui ont fait prise. En se solidifiant rapidement au contact des coquilles, la fonte trempante (1) blanchit et subit une augmentation de densité qui agrandit encore le volume des cavités de tassement.

Quelquefois les cavités de contraction se forment presque tout à fait à la partie supérieure des pièces et si elles sont larges, la mince épaisseur de métal qui les recouvre s'infléchit en produisant un creux plus ou moins profond, souvent gercé ou crevassé, donnant à ces pièces caverneuses un mauvais aspect. De plus, si ces pièces caverneuses ont à être ajustées ou polies sur leur surface qui, dans le moule, occupait la partie supérieure, le plus souvent l'ajustage enlevant la croûte, met à nu les cavernes et oblige à rejeter ces pièces.

On évite bien, plus ou moins, les cavités de contraction en coulant les pièces avec une ou plusieurs masselottes situées directement au-dessus des parties les plus massives de ces pièces, en faisant ces masselottes d'autant plus lourdes que les pièces à obtenir sont plus épaisses, en donnant aux masselottes un empattement aussi large que possible; en entretenant libre, le plus longtemps qu'on le peut, la communication de la fonte liquide de la masselotte avec celle de la pièce au moyen d'une tige de fer engagée dans l'étranglement formé à l'empattement de la masselotte, et en faisant monter et descendre cette tige dans l'étranglement pour casser les grumeaux de fonte qui s'y solidifient; en remplissant la masselotte de fonte liquide très chaude, à mesure que celle qui y était précédemment s'écoule dans l'intérieur de la pièce

(1) Les fontes trempantes, coulées en coquille, augmentent de densité. Si ensuite on les chauffe au rouge, en même temps que la trempe disparaît, elles reviennent à leur densité primitive en augmentant de volume en tous sens. Si l'on chauffe lentement et pendant longtemps une fonte quelconque, elle perd son silicium, qui se transforme en silice, et son carbone, qui se dégage en oxyde de carbone, son fer s'oxyde, la densité de cette fonte diminue, tandis que son volume augmente jusqu'à une certaine limite.

pour remplir les cavités qui s'y forment. Malgré toutes ces précautions, quand la fonte est peu carburée et très tassante, qu'elle se fige promptement, l'étranglement de la masselotte à son empattement sur la pièce est bientôt engorgé de fonte solidifiée, l'action de la masselotte devient impossible et la pièce contenant encore de la fonte liquide après cet engorgement devient caverneuse par le retrait de cette fonte liquide en se solidifiant. Du reste, on ne peut compter d'une façon absolue sur les masselottes, pour empêcher les cavités de tassement de se produire dans les pièces coulées, que si ces masselottes sont assez hautes et peuvent recevoir la même section horizontale que celle des pièces qu'elles doivent abreuver, comme dans les viroles pour segments de pistons dans des cylindres ou prismes coulés verticalement; à l'ajustage on fait tomber la partie supérieure de ces pièces et l'on est à peu près certain que leur partie inférieure restant est saine. Mais combien est-il rare, dans le moulage, d'avoir à produire des pièces de ce genre et combien sont fréquents les cas où l'on ne peut employer que des masselottes à empattements de section si restreinte que l'effet produit par cette réserve de fonte liquide est presque nul, parce qu'elle se solidifie bien avant celle de l'intérieur des pièces.

D'un phénomène de surnage qui se présente quand on plonge un morceau de fonte solide, chaud ou froid, dans un bain de fonte liquide, on en a conclu que la fonte à l'état liquide a une densité supérieure à celle de la même fonte à l'état solide, par analogie avec la glace qui également surnage l'eau et a une densité inférieure à celle de cette dernière; et l'on a aussi conclu de l'excès de densité de la fonte liquide sur la fonte solide, qu'en se solidifiant, la fonte subit une expansion en volume, et que c'est à cette expansion que l'on doit la finesse de certains moulages délicats formés avec une perfection d'autant plus grande que le métal coulé est plus chaud et plus fluide.

Il est évident que la pression exercée par le métal très liquide contre les parois du moule suffit seule à expliquer que les contours, les arêtes vives des objets les plus délicats soient atteints, sans qu'il faille recourir à l'expansion de la fonte dans le moule; quand la fonte quoique liquide est coulée un peu froide, elle s'étend encore dans les moules, mais ne donne aux pièces que des formes molles et des surfaces défectueuses, parce que le moindre refroidissement qu'elle éprouve la rend demi-pâteuse et qu'elle n'obéit plus comme un liquide à la pression hydrostatique due à la charge de la coulée.

D'ailleurs la fonte n'est pas le seul métal présentant à l'état solide le phénomène de surnage dans un bain liquide de même nature; tous les métaux employés en fonderie : l'acier, le cuivre, le zinc, le plomb, tant qu'ils sont solides, se maintiennent flottants sur leur bain en fusion et ne peuvent généralement produire de moulages présentant le même degré de finesse que la fonte, soit parce que ces métaux sont moins fluides que la fonte, soit que refroidis au contact du moule, ils perdent leur fluidité plus rapidement qu'elle, soit enfin parce qu'ils attaquent, en le mouillant, le sable formant les parois du moule et s'infiltrent dans ses interstices.

Pour la fonte, en particulier, il ne me semble pas admissible que le phénomène de surnage de la fonte solide sur la fonte liquide soit dû à l'expansion de ce métal pendant sa solidification, ou à une moindre densité du métal solidifié par rapport à sa densité à l'état liquide.

En effet, comme on démontre l'expansion de l'eau pendant sa solidification en en remplissant un vase à col étroit et que la congélation fait éclater, j'ai répété cette expérience en employant de la fonte liquide au lieu d'eau, la coulant jusqu'à remplir complètement l'intérieur d'une bombe creuse de 210 $^m/_m$ de diamètre extérieur et de 140 $^m/_m$ de diamètre intérieur, et refroidissant avec de l'eau le jet de

coulée pour qu'il forme bouchon. Non seulement cette bombe ne s'est pas fendue pendant la solidification de la fonte qu'elle contenait; mais après avoir été cassée, elle a montré que le noyau de fonte qui s'y était solidifié avait pris un peu de jeu par son retrait. On peut objecter à cette expérience qu'elle a été faite sur un trop faible volume de fonte liquide. Pour la reproduire en grand, il suffit de retirer de leur moule avec précaution pour ne pas l'endommager, les pièces longues, massives et simples de forme, puis de présenter le modèle ayant servi au moulage de ces pièces, pour reconnaître que ce modèle rentre de nouveau exactement dans le moule et qu'au moins la longueur de ce dernier n'a pas varié.

Cependant, la fonte coulée et refroidie dans ces moules a non seulement subi un retrait d'environ 3 0/0 en volume, à l'état solide, mais s'est encore contractée à l'état liquide. J'ai vu dans certaines pièces à section rectangulaire de $0^m300/0^m 200$, pesant 2300^{kg} et coulées horizontalement, employer jusqu'à 100 et 120^{kg} de fonte (soit environ 5 0/0) pour remplacer dans les masselottes le métal qui s'était écoulé à l'intérieur de ces pièces pour compenser le retrait pendant la solidification ; et cependant quelques-unes de ces pièces, cassées ensuite, ont encore présenté d'assez larges cavités de tassement, bien que le milieu de leur section ait été occupé par un tuyau en fer creux, de $65^m/^m$ de diamètre intérieur, noyé dans la fonte et qui a dû refroidir la fonte liquide en servant de centre de solidification à l'intérieur de la masse de métal en fusion, et par suite réduire sensiblement le retassement total.

Dans ces pièces, nous nous trouvons donc en présence d'un déficit de 3 0/0 de retrait à l'état solide, augmenté de plus de 5 0/0 de retrait à l'état liquide et pâteux, soit d'au moins 8 0/0 de retrait total en volume, par rapport à ce qu'auraient dû être ces pièces si, après leur refroidissement, elles eussent conservé exactement les dimensions du modèle,

qui sont celles qu'elles ont dû posséder à l'état liquide ; et si 7,2 est la densité moyenne de cette fonte refroidie, sa densité moyenne, immédiatement après la coulée, n'a pu être que :

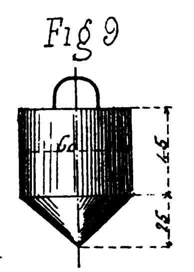
$$7{,}2\,(1 - 0{,}08) = 6{,}62.$$

Donc, pendant le passage de la fonte de l'état liquide à l'état solide, il y a eu contraction et non expansion dans le volume de cette fonte. Ici, l'expérience quoique encore assez grossière, mais portant sur des pièces de poids considérable, ne peut laisser de doutes.

Cependant il est moins douteux encore, et on le vérifie tous les jours, que la fonte solide surnage la fonte liquide.

En admettant que ce phénomène soit dû simplement à une différence de densité de la fonte dans ces deux états, voici une expérience que je fis pour déterminer la densité de la fonte liquide.

Ayant coulé, avec de la fonte prise dans une grande poche, un petit cylindre terminé par un cône et ayant les dimensions indiquées ci-contre *(fig. 9)*, ce cylindre démoulé et refroidi immédiatement fut placé sur la fonte liquide contenue dans la grande poche de laquelle il provenait ; par conséquent ce cylindre et la fonte liquide dans laquelle il fut plongé étaient de nature identique. Il désafleura le niveau de la fonte liquide de 5 à 7m/m quantité difficile à mesurer avec précision à cause du rayonnement insupportable de la fonte liquide). En prenant 6m/m comme moyenne de désaffleurement et ce flotteur ayant un volume égal à celui d'un cylindre de même diamètre et de :



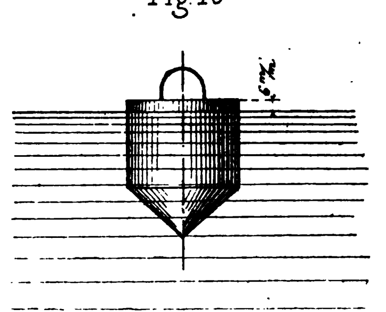
$$45^{m}/_{m} + \frac{25^{m}/_{m}}{3} = 53^{m}/_{m},3 \text{ de hauteur,}$$

la poussée qu'il éprouva, de la part de la fonte liquide dans laquelle il était en partie immergé, correspondant au poids de volume liquide déplacé *fig. 10)*, soit au poids d'un cylindre

de fonte liquide de même diamètre que celui de la fonte solide et de :

$$45^{m}/^{m} + \frac{25^{m}/^{m}}{3} - 6^{m}/^{m}$$

$= 47^{m}/^{m},3$ de hauteur, si 7,2 était la densité moyenne de ce flotteur, celle de la fonte liquide aurait dû être :



$$\frac{7,2 \times 53,3}{47,3} = 8,1 \text{ environ ;}$$

c'est-à-dire qu'elle devait être notablement supérieure à celle du fer; et de fait, le fer et l'acier surnagent la fonte liquide.

Si, en réalité, il y avait excès de densité de la fonte liquide sur la fonte solide et que cet excès fût de :

$$\frac{8,1 - 7,2}{7,2} = \frac{0,9}{7,2} = 12,5 \ 0/0,$$

comme nous venons de le trouver, une expansion aussi considérable que celle qui devrait en résulter ne pourrait passer inaperçue; la fonte après avoir été versée dans un moule devrait, à mesure de sa solidification, gonfler en tous sens, refouler les parois du moule ou se déverser hors du moule en remontant par sa coulée. Eh bien, on ne constate jamais rien de semblable; au contraire, des cavités de tassement se forment à l'intérieur de la fonte et l'on trouve toujours, en sortant les pièces du moule, qu'elles ont pris en tous sens un retrait linéaire souvent supérieur à 1 0/0, correspondant à une contraction totale, directement mesurable, d'au moins 3 0/0, à l'état solide, sans tenir compte de la contraction totale à l'état liquide, qu'il est presque généralement impossible d'apprécier si l'on ne romp pas les pièces dans leur partie la plus massive. Nous avons vu que cette contraction était plutôt supérieure qu'inférieure à 5 0/0 dans les pièces à section rectangulaire dont il a été question précédemment

et qui cependant n'avaient pas été produites avec les fontes les plus tassantes.

Ce sont les fontes peu carburées (fonte malléable) et l'acier fondu qui, malgré leur retrait considérable depuis le commencement de leur solidification jusqu'à leur complet refroidissement, donnent lieu à des cavités de tassement les plus volumineuses et qu'il est presque impossible d'éviter, quelque précaution que l'on prenne dans le moulage.

Comme la fonte grise ordinaire, la fonte malléable et l'acier fondu surnagent un bain métallique de nature identique à la leur. Un cylindre semblable à celui que représente la *figure 9* mais en acier, plongé froid dans le bain d'acier dont il provint, le désaffleurait de 5 m/m environ; 7,8 étant la densité moyenne de cet acier froid (1), la densité du même acier liquide serait donc :

$$\frac{7,8 \times 53^{m}/^{m}3}{53,3 - 5} = 8,6 \text{ environ,}$$

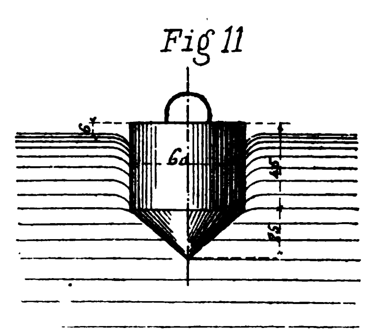
c'est-à-dire de $\frac{8,6 - 7,8}{7,8} = 9,75$ 0/0 supérieure à la densité de l'acier solide, ce qui, vu le retrait et le tassement considérable de ce métal, n'est pas plus possible pour l'acier que pour la fonte.

Il semble donc qu'il y ait dans ce phénomène de surnage une anomalie et l'on ne peut guère l'expliquer qu'en remarquant que la fonte, le fer et l'acier, à l'état solide, ne sont pas mouillés quand on les plonge dans un bain liquide de métal de même nature qu'eux. On remarque une dépression *(fig. 11)* du métal liquide tout autour du métal solide flottant sur le bain, comme lorsqu'on fait flotter du fer sur du mercure;

(1) Le même essai appliqué au plomb montre que pour ce dernier métal il y a affleurement de la partie supérieure du cylindre à extrémité conique, lorsqu'il est plongé dans un bain liquide de nature identique à la sienne. Le cylindre en plomb, quoique flottant encore à la surface du bain, est complètement immergé.

d'où l'on doit conclure à une répulsion des molécules liquides sur les molécules solides qui les avoisinent.

La poussée verticale qui maintient flottant et en partie immergé le métal solide, certainement plus dense que le métal liquide, ne doit-elle pas être attribuée à la répulsion moléculaire se manifestant à la surface de contact du même métal à deux états différents? N'y a-t-il pas là un phénomène analogue à ceux de capillarité entre corps qui ne se mouillent pas? Cela ne me semble pas douteux et explique d'une manière bien plus satisfaisante et plus conforme aux faits observés, la surnage du métal solide sur le métal liquide, dans les composés de la famille du métal fer, que l'hypothèse insoutenable de la diminution de densité et de l'expansion de ces métaux pendant leur solidification, hypothèse qui, du reste, n'a d'autre appui pour elle que sa similitude avec l'expansion de l'eau en se congelant, et cette dernière est une exception à la loi générale : Un corps, en fondant, augmente de volume (1).



Dans la coulée de certains aciers doux, non silicieux, comme le Bessemer, il arrive souvent qu'au moment où cet acier commence à se solidifier dans le moule ou la lingotière, le métal bouillonne, monte et se déverse au dehors; mais ce fait ne provient que des gaz (oxyde de carbone généralement) que cet acier tenait en dissolution et qui sont expul-

(1) Il doit en être probablement de même pour le bismuth, l'argent, etc., qu'en physique on classe avec la fonte et la glace comme faisant exception à cette loi générale. M. Kopp a d'ailleurs trouvé, à l'aide de son appareil, que l'alliage fusible de H. Rose (bismuth deux parties — plomb une partie, — étain une partie) qui fond à 95°, subit un accroissement rapide de volume pendant sa fusion.

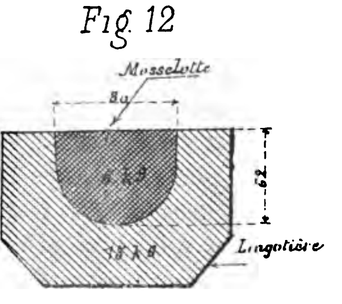
sés à la suite d'un abaissement de température. Dans leur dégagement tumultueux, ils entraînent avec eux une partie du métal liquide, sans que le déversement qui en résulte soit dû à une expansion de ce métal.

Un fait analogue se passe dans la fonte quand les moules ou les noyaux renferment de l'humidité ou vapeur d'eau qui se décomposant au contact de la fonte rouge produit de l'hydrogène qui s'échappe, en entraînant de la fonte liquide avec lui. Ce dégagement de gaz ne s'effectue pas toujours avec vivacité et projection de fonte liquide hors du moule, il est quelquefois très lent et ne fait que boursoufler les jets de coulée dont la surface refroidie et parvenue à l'état demi-fluide ou pâteux, se gonfle sans qu'encore ce gonflement provienne de l'expansion du métal, ainsi que l'on peut s'en assurer en brisant ces jets; on les trouvera plus ou moins remplis de soufflures.

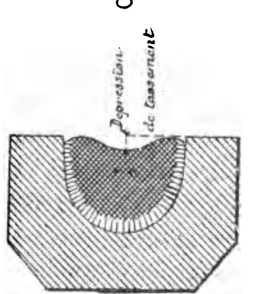
Donc, en résumé, l'augmentation de volume de la fonte, dans son passage de l'état liquide à l'état solide, sur laquelle on s'appuie pour expliquer le phénomène de surnage de la fonte solide dans un bain de fonte liquide, ne se vérifie pas et n'est certainement pas vraie, malgré les apparences que présente la fonte liquide se refroidissant librement à l'air et se boursouflant à sa surface probablement par suite de son oxydation, de son absorption d'oxygène pris à l'air ambiant. Comme, en général, les fontes présentent divers degrés de tassement suivant qu'elles sont plus ou moins carburées, qu'elles renferment plus ou moins de soufre et probablement d'autres métalloïdes encore, qui exercent également une action sur le tassement, pour l'étude complète d'une fonte de moulage donnée, il est indispensable de rechercher à quel point cette fonte est tassante, une pièce saine et non caverneuse, dans ses parties épaisses et massives, ne pouvant être obtenue qu'avec des fontes donnant le minimum de tassement.

Cette recherche peut simplement se faire en remplissant

de la fonte à essayer une petite lingotière en fonte (*fig. 12*), par suite de la trempe en coquille qu'éprouvera la fonte versée dans cette lingotière, le tassement sera quelque peu exagéré et pourra se mesurer par la profondeur de la dépression qui se manifestera au milieu de la surface de la masselotte, par rapport à ses bords (*fig. 13*).



En même temps cet essai montrera à quel point la fonte éprouvée prend la trempe en coquille, en brisant la masselotte on pourra mesurer la profondeur de cette trempe, comparer encore, à ce point de vue, les fontes entre elles, reconnaître si la fonte trempée, et devenue blanche, se raccorde par une transition insensible avec la partie non trempée qui doit rester grise; car de la parfaite liaison de la partie trempée avec la partie douce dépend la résistance de la pièce, toute transition nette et tranchée entre les parties trempées et non trempées, que l'on rencontre fréquemment dans les fontes communes, détermine à la surface de séparation de ces deux fontes des points d'écaillement et de rupture.



Cette question de trempe en coquille n'est pas non plus indifférente en fonderie, puisque certaines pièces (cylindres cannelés de meunerie, cylindres de laminoirs à polir, étampes, meules à broyer, etc.) exigent pour le durcissement de leur surface, que cette surface soit coulée en coquille, et ce durcissement n'est obtenu qu'autant que la trempe se produit; tandis que pour les petites pièces minces, la plupart du temps coulées dans des moules non séchés, il faut écarter

les fontes trempantes, pour éviter la production de ces moulages durcis à leur surface et sur les arêtes, par la trempe contractée au contact du sable humide.

Pour produire des pièces en fonte trempée, ainsi que nous le savons, on coule la fonte liquide dans un moule qui est le plus généralement en fonte, quoique toute autre matière puisse également servir à la confection du moule, pourvu qu'elle soit bonne conductrice de la chaleur et ne se détériore pas par le contact subit de la fonte liquide, ou l'absorption de la chaleur.

Le caractère des fontes convenant à la coulée en coquille se traduit par la propriété qu'ont ces fontes de montrer une texture truitée ou grise, lorsqu'elles sont coulées dans des moules en sable ou en argile, et de ne présenter cette texture qu'à l'intérieur de la masse, quand elles ont été versées dans un moule en fonte, tandis que la surface de la pièce en contact avec ce moule, et jusqu'à une certaine profondeur, devient blanche et fibreuse.

La fonte est toujours cristalline dans l'intérieur de la partie trempée, les principaux axes de symétrie des cristaux sont toujours dirigés normalement à la surface.

Le but principal du moulage en coquille est d'associer la ténacité et la douceur propres à la fonte grise, ou à la fonte truitée, avec la durèté de l'acier dans les parties travaillantes. La dureté est si grande qu'on ne peut tourner les surfaces qu'avec un couteau d'acier trempé, à tranchant rectangulaire, le tournage donnant des copeaux courts, aigus, ayant la orme d'aiguilles.

La formation de la couche trempée dépend en premier lieu de la propriété du métal employé, de bien tremper, c'est-à-dire de sa teneur en carbone combiné et de l'absence d'un excès de graphite, de silicium; en second lieu, du rapport entre la masse de la partie à tremper à celle de toute la pièce, et en troisième lieu de la masse de la pièce entière.

Lorsque cette masse est très considérable, il peut arriver que la partie trempée soit de nouveau radoucie, parce que le noyau de la pièce cède la chaleur nécessaire à cette transformation.

Pour couler des pièces en coquille, le fondeur doit avoir assez l'expérience de ses fontes pour savoir jusqu'à quelle profondeur elles pourront tremper, afin de ne rien entreprendre d'impossible et d'arriver exactement à l'épaisseur de trempe désirée, lorsque cette trempe est prescrite. Il doit donc être maître du procédé et dans tous les cas ses efforts doivent tendre à conserver sous la partie trempée une masse aussi considérable que possible de fonte grise n'ayant subi aucun changement, parce que de cette manière la pièce résistera mieux à tous les efforts; car il ne faut pas l'oublier, le but de la trempe est plutôt de résister à l'altération, à la déformation des surfaces travaillantes que de présenter une grande ténacité.

Dans la plupart des cas, une trempe de $25^{m}/^{m}$ de profondeur est plus que suffisante, car après l'usure de la partie durcie, les pièces ne peuvent plus servir à cause de la réduction de leur grosseur; dans bien des cas, on ne demande qu'une trempe moitié aussi forte. Toutefois lorsque la partie durcie est sujette à usure rapide, par exemple dans les cylindres broyeurs, et que la surface doit être souvent réparée sur le tour, le cylindre est d'autant meilleur que la trempe est plus profonde.

Comme l'action de la coquille ou du moule réfrigérant, sur la masse de fonte liquide rapidement coulée, consiste exclusivement dans le refroidissement des parties de fonte touchant les parois du moule, proportionnellement à la bonne transmission et à la grande capacité d'absorption de chaleur du métal de la coquille, il s'ensuit que la masse de la coquille est bien un des points principaux qui régissent l'action de cette dernière pendant le coulage, lorsque la forme et le poids de la pièce à couler, et par conséquent la relation entre la masse et la surface sont données.

En d'autres termes, la capacité d'absorption de chaleur par une coquille doit être assez grande pour qu'après le remplissage du moule, la solidification de la couche extérieure de la fonte puisse se produire en quelques minutes, et qu'à ce moment la coquille puisse absorber encore assez de calorique pour empêcher la refonte de la couche trempée, par la chaleur cédée par le noyau de la pièce resté fluide, jusqu'à ce que toute la fonte se soit figée.

Dans le coulage en coquille, la perte de chaleur, avant la solification de la première couche de la surface à tremper, est si faible en comparaison de la chaleur existant dans la fonte liquide, qu'elle peut être négligée.

Soit P, le poids de la pièce à couler,

Q, le poids de la coquille,

t, la température moyenne de la coquille à l'instant de la coulée,

t_1, la température moyenne de la coquille au moment où elle cesse d'absorber de la chaleur et où l'équilibre de température s'est établi,

T, la température de la fonte liquide pendant la coulée,

c, la chaleur spécifique de la fonte à la température t,

c_1, la chaleur spécifique de la coquille à la température t_1,

c_2, la chaleur spécifique de la fonte à la température T.

A l'instant où la coquille est parvenue à sa température maximum t_1, on a l'égalité suivante entre la quantité de chaleur perdue par la fonte liquide et celle que la coquille a dû gagner :

$$P(c_2T - c_1t_1) = Q(c_1t_1 - ct)$$

d'où

$$\frac{Q}{P} = \frac{c_2T - c_1t_1}{c_1t_1 - ct}.$$

Or, en pratique, comme la surface interne de la coquille est presque toujours moyennement chauffée, on peut admettre que la température de cette surface interne est d'environ

300° et que la température moyenne t de la coquille est de 150°, que la température T de la fonte liquide pendant la coulée est de 1200° environ. Comme il est nécessaire que la surface interne de la coquille n'arrive pas à son point de fusion quand sa température est maximum, il faut qu'elle n'atteigne pas la température 1000°, soit donc 900° le maximum de température que devra prendre la surface interne de la coquille à l'instant où sa température cesse de s'élever. Dans cet instant, la température moyenne t_1 de la coquille sera approximativement $\frac{900°}{2} = 450°$.

La chaleur spécifique de la fonte à la température $t = 150°$ est environ $c. = 0{,}12$, la chaleur spécifique de la fonte à la température $t_1 = 450°$ est approximativement $c_1 = 0{,}14$; et cette chaleur spécifique à la température $T = 1200°$ est aussi approximativement $c_2 = 0{,}19$ (1).

D'après ceci on a :

$$\frac{Q}{P} = \frac{c_2 T - c_1 t_1}{c_1 t_1 - ct} = \frac{(0{,}19 \times 1200) - (0.14 \times 450)}{(0{,}14 \times 450) - (0{,}12 \times 0{,}150)} = 3{,}65.$$

Ainsi donc, P étant le poids de la pièce à couler en coquille, le poids à donner à cette coquille devrait être 3,65 P environ ; et, en effet, l'expérience pratique montre que l'on arrive à un poids de coquille satisfaisant en adoptant un chiffre compris entre 3 et 4, pour rapport du poids de la coquille à celui de la pièce à couler.

Lorsqu'une trempe aussi profonde que celle procurée par ce poids de coquille n'est pas nécessaire, on peut la réduire par l'échauffement intérieur de la coquille avant la coulée ; ce qui revient à augmenter la température t_1 d'équilibre et à rendre la solidification moins rapide.

(1) Les accroissements de chaleur spécifique, dans la fonte, par degré de différence de température, et comptés depuis 0°, vont en progressant à mesure que les températures s'élèvent. — « Etudes sur la Fonderie. » Voir *Bulletin technologique,* mars-avril 1883, de la Société des Anciens Élèves des Écoles nationales d'Arts et Métiers.

De même, avec une épaisseur de coquille constante et une même fonte, on peut faire varier l'épaisseur de la trempe en faisant varier la différence entre la température de coulée et la température de solidification; c'est-à-dire en coulant chaud pour tremper moins et coulant froid pour tremper plus. Le métal liquide coulé chaud renfermera un grand excès de chaleur qui devra être absorbé par la coquille avant que la solidification de la fonte à son contact ne commence à s'opérer; cet excès de chaleur retardera donc la solidification et la rendant plus lente, diminuera la profondeur de trempe. L'inverse aura lieu dans la coulée avec fonte relativement froide, pratique assez peu recommandable et à laquelle on ne doit recourir qu'en cas de nécessité, la fonte coulée froide perdant trop de sa résistance.

Maintenant que nous avons passé en revue les principales propriétés des fontes, nous pouvons revenir aux divers essais comparatifs mentionnés précédemment.

Ayant eu l'occasion de me procurer une pointe de cœur de croisement de voie, en fonte Hartguss, de Grüson, employée sur les chemins de fer allemands, je fis sur cette fonte, sur de la fonte d'Écosse, Coltness n° I, et sur une bonne fonte n° III provenant d'hématites rouges et brunes, les essais comparatifs dont les résultats sont mentionnés ci-dessous:

DÉSIGNATION DE LA FONTE	RÉSISTANCE A LA TRACTION par millimètre carré.	RÉSISTANCE AU CHOC Hauteur de chute du boulet.	RÉSISTANCE A LA FLEXION par millimètre carré.	USURE SUR MEULE EN GRÈS	RETRAIT PAR MÈTRE COURANT	TASSEMENT SUR MASSELOTTE de 62 m/m épaisseur.	TREMPE SUR MASSELOTTE de 62 m/m épaisseur.	DENSITÉ
	kg	m	kg	m/m³	m/m	m/m	m/m	
Hartguss Grüson	22,7	0,46	33,39	3000	11,4	4,5	8	7,12
Coltness n° I. .	13,3	0,27	19,13	4100	10,9	0	0	6,95
Hématite n° III.	17,1	0,37	19,69	3780	10,5	0	4	7,01

La comparaison de ces chiffres de résistances fait bien



reconnaître que la fonte Hartguss, de Grüson, possède une ténacité remarquable et très supérieure à celle des deux autres fontes. D'après M. S. Jordan (1), cette fonte tenace de Grüson serait obtenue en mélangeant 400^{kg} fonte au charbon de bois, à gros grains, avec 100^{kg} fonte spiegel (miroitante), et le principe général de leur production serait l'emploi d'un mélange de fonte grise, très résistante, avec une certaine proportion de spiegeleisen très manganésé.

A Sayn (près Neuwied, sur le Rhin), on emploierait un mélange composé de :

4 parties fonte grise, au bois ;
2 parties fonte grise, au coke ;
1 partie spiegeleisen, au coke de Mühlofen,

ce dernier métal renferme 7 à 8 0/0 de manganèse.

La fonte de deuxième fusion provenant du mélange de ces diverses sortes de fontes posséderait toutes les qualités recherchées dans la fonte Hartguss ; la résistance provenant de la présence du manganèse et de la faible proportion de silicium, et la propriété de blanchir assez facilement et sur une assez forte épaisseur tenant sans doute à l'influence du spiegeleisen, où tout le carbone se trouve à l'état de combinaison chimique, l'absence de séparation brusque entre la partie trempée et la partie douce pouvant être attribuée à l'absence du silicium qui rend la fonte plus homogène et à la présence du manganèse.

Nos fontes d'hématite et nos spiegeleisen étant produits avec des hématites rouges et brunes et de la mine spathique du Nassau, et ne différant pas de celles du pays de Siegen, il me fut facile en reproduisant les mélanges indiqués par M. S. Jordan, de vérifier les résistances qu'ils permettent d'obtenir et d'étudier la marche de ces résistances en faisant varier les proportions relatives de la fonte spiegel employée avec la fonte hématite manganésifère n° III.

---

(1) *État présent de la métallurgie du fer dans le pays de Siegen (1864)*, p. 107.

Les mélanges essayés furent composés de :

Mélange A { 90 pour cent Fonte hématite n° III,
10 — Fonte spiegel ;

— B { 80 — Fonte hématite n° III,
20 — Fonte spiegel ;

— C { 66,6 — Fonte hématite n° III,
33,3 — Fonte spiegel ;

— D { 50 — Fonte hématite n° III,
50 — Fonte spiegel.

ils donnèrent aux différentes épreuves les résultats consignés dans le tableau suivant.

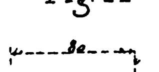
DÉSIGNATION des MÉLANGES DE FONTES	RÉSISTANCE A LA TRACTION par millimètre carré.	RÉSISTANCE AU CHOC hauteur de chute du boulet.	RÉSISTANCE A LA FLEXION par millimètre carré.	USURE SUR MEULE EN GRÈS	RETRAIT PAR MÈTRE COURANT	TASSEMENT SUR MASSELOTTE de 62 m/m épaisseur.	TREMPE SUR MASSELOTTE de 62 m/m épaisseur.	DENSITÉ
	kg	m	kg	m/m³	m/m	m/m	m/m	
Hématite n° III pure.	17,1	0,37	19,69	3780	10,5	0	4	7,01
Mélange A . . .	16	0,37	21,6	3420	10,8	0	4,25	7
— B. . . .	15,3	0,36	24,4	3140	11,2	0	4,75	6,94
— C. . .	14,3	0,30	24,8	2780	11,2	0	6	6,87
— D. . .	11,9	0,25	17,8	1160	11,2	3	25	7,16

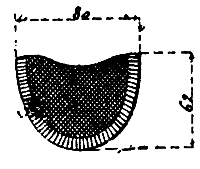
Les cassures des barreaux d'essais et de la masselotte coulée en coquille avec chacun de ces mélanges ont donné lieu aux remarques particulières suivantes :

Les mélanges A, B, C ont produit des barreaux à cassure noire, à grains fins et brillants, de même aspect que celui des barreaux en fonte hématite pure; cependant avec grains un peu plus gros dans le mélange C, les barreaux d'essai du mélange D étaient encore à cassure noire, à grains moyens et brillants; mais parsemés de quelques taches blanches.

La masselotte coulée en coquille, suivant le profil ci-contre

(*fig.* 14), avec le mélange A, a donné de la fonte noire très serrée et de même aspect que celui de la masselotte coulée dans la même lingotière avec fonte hématite n° III pure; la profondeur de la trempe, à la partie inférieure, n'a été que très légèrement plus grande, et aiguillée plutôt que cristalline à facettes, la partie supérieure était gonflée et non retassée.





Avec le mélange B, la masselotte trempée sur à peine 5m/m de profondeur a présenté, dans cette partie blanche et cristalline, les facettes du spiegel se perdant dans le restant de la cassure par des aiguilles de cristallisation se prolongeant d'environ 9m/m dans la cassure noire, à grains excessivement serrés. La surface supérieure de la masselotte présentait encore du gonflement.

Dans le mélange C, le gonflement de la partie supérieure de la masselotte a disparu, cette surface était ondulée. La portion trempée, à la partie inférieure, est devenue plus considérable et présentait nettement les facettes de cristallisation de la fonte spiegel se raccordant à la fonte noire de l'intérieur par des traces de truité et des aiguilles de 15m/m environ de longueur de pénétration dans la fonte noire à grains fins.

La masselotte coulée en coquille avec le mélange D a donné encore de la fonte noire dans la partie supérieure et passant insensiblement, sans truité, au blanc rayonnant à larges aiguilles de la fonte spiegel, ces aiguilles se prolongeant par des taches blanches jusque dans la partie supérieure.

La surface supérieure de cette masselotte, dans son milieu, était devenue concave et a présenté une dépression de 3m/m par rapport à ses bords.

D'après les chiffres de résistance trouvés, et considérablement inférieurs à ceux qu'avait donnés la fonte Hartguss de

Grüson, et encore plus d'après la différence d'aspect de la cassure des masselottes coulées avec les mélanges A, B, C et D, de fonte hématite n° III avec de la fonte spiegel, par rapport à celui de la masselotte obtenue dans la même coquille avec la fonte Grüson, il n'est pas douteux que cette dernière fonte ne soit produite à l'aide de mélanges tout autres, à la fois plus pauvres en carbone (1) et en manganèse. Dans sa partie trempée, la fonte Grüson n'offre pas le miroitement du spiegel que l'on trouve dans nos mélanges B, C et D; et du reste, dans ces derniers mélanges, la partie trempée et cristallisée en facettes serait trop dure pour pouvoir être attaquée par des outils en acier dans le tournage.

La fonte hématite n° III employée dans ces mélanges a pour composition moyenne :

Carbone total.	3,5	0/0.
Silicium	2,15	—
Manganèse	2,5	—
Phosphore	0,36	—

et la fonte spiegel (miroitante) entrée dans ces mélanges a pour composition moyenne :

Carbone combiné	5,1	0/0.
Silicium	0,4	—
Manganèse	7,1	—

Donc la teneur en carbone et en manganèse a été augmentée d'autant plus, dans les fontes produites avec ces mélanges, que la proportion de spiegel a été plus élevée.

Leur fusion ayant été faite au creuset, la dénaturation a dû être excessivement faible, de sorte que ces mélanges ont dû conserver à peu près en carbone, silicium et manganèse, les teneurs suivantes :

(1) Le dosage du carbone sur un fragment de boulet trempé, de Grüson, a fourni 2,4 0/0 seulement au professeur L. Grüner.

A	Carbone total	3,5 ×0,9 +5,1×0,1 =3,14 +0,51=3,65 C 0/0
	Manganèse	2,5 ×0,9 +7,1×0,1 =2,25 +0,71=2,96 Mn0/0
	Silicium	2,15×0,9 +0,4×0,1 =1,935+0,04=1,975 Si 0/0
B	Carbone total	3,5 ×0,8 +5,1×0,2 =2,8 +1,02=3,82 C 0/0
	Manganèse	2,5 ×0,8 +7,1×0,2 =2 +1,42=3,42 Mn0/0
	Silicium	2,15×0,8 +0,4×0,2 =1,72 +0,08=1,8 Si 0/0
C	Carbone total	3,5 ×0,66+5,1×0,33=2,33 +1,7 =4,03 C 0/0
	Manganèse	2,5 ×0,66+7,1×0,33=1,66 +2,37=4,03 Mn0/0
	Silicium	2,15×0,66+0,4×0,33=1,43 +0,13=1,56 Si 0/0
D	Carbone total	3,5 ×0,5 +5,1×0,5 =1,75 +2.55=4,3 C 0/0
	Manganèse	2,5 ×0,5 +7,1×0,5 =1,25 +3,55=4,8 Mn0/0
	Silicium	2,15×0,5 +0,4×0,5 =1,075+0,2 =1,275 Si0/0

Comme il pourrait être intéressant de comparer les résultats des épreuves à la composition de ces diverses fontes grises, à teneur en manganèse et en carbone si élevée, nous faciliterons cette comparaison en représentant graphiquement chaque série de résultats d'un même mode d'essai, en même temps que les teneurs en carbone, manganèse et silicium des mélanges qui ont fourni ces résultats.

Pour cette représentation, sur un axe d'abscisses XY *(pl. I fig. 1)* de longueur égale à 100$^m/_m$, prenons des longueurs XA, XB, XC, XD, respectivement égales à 10, 20, 33,3 et 50$^m/_m$ représentant la proportion de spiegel entrant dans ces mélanges, élevons des ordonnées sur chacun des points limitant les longueurs d'abscisses et portons sur ces ordonnées des longueurs proportionnelles aux teneurs en carbone, manganèse et silicium que nous voulons représenter des mélanges A, B, C et D; les ordonnées extrêmes, élevées aux points X et Y, correspondront X, à la fonte hématite n° III pure et Y, à la fonte spiegel. Réunissant par une ligne continue chacun des points de ces ordonnées correspondant aux teneurs en carbone, par une deuxième ligne continue, les points de ces ordonnées correspondant

aux teneurs en manganèse et par une troisième ligne continue les points de ces ordonnées correspondant aux teneurs en silicium, nous trouvons, ainsi que nous devions nous y attendre, que les lignes de représentation CC, Mn*Mn*, Si*Si*, ainsi obtenues sont droites.

Si, maintenant sur la même épure et sur les ordonnées correspondant à chaque mélange, nous portons à partir de l'axe XY des longueurs X*x*, A*a*, B*b*, C*c*, D*d* proportionnelles aux chiffres de résistance à la traction, par millimètre carré, de la fonte hématite n° III et des mélanges A, B, C, D, la courbe obtenue en joignant les points *x*, *a*, *b*, *c*, *d* représentera non seulement la résistance à la traction de ces diverses fontes; mais encore assez approximativement celle des mélanges intermédiaires que l'on pourrait produire en mélangeant la fonte hématite n° III avec la fonte spiegel en toute autre proportion que celle de 10, 20, 33,3 et 50 0/0 de spiegel existant dans les mélanges étudiés.

Cette loi de variation *xabcd*, des résistances à la traction, nous montre que la résistance à la traction décroît d'abord faiblement, puis de plus en plus, à mesure que la proportion de spiegel employée s'élève; c'est-à-dire à mesure que la fonte produite renferme plus de manganèse et devient plus carburée, bien que la teneur en silicium diminue.

Sur cette même épure et sur les ordonnées correspondantes, portons à partir de la ligne d'axe XY des longueurs X*x'*, A*a'*, B*b'*, C*c'*, D*d'* proportionnelles aux hauteurs moyennes de chute du boulet qui ont déterminé la rupture des barreaux essayés au choc, la courbe *x'a'b'c'd'* trouvée en joignant les points *x'*, *a'*, *b'*, *c'*, *d'* représentera graphiquement la résistance au choc des mélanges A, B, C et D; et approximativement, aussi celle des mélanges intermédiaires. Cette loi de variation des résistances au choc est à peu près de même forme que la courbe *xabcd* de représentation des résistances à la traction; mais plus prononcée, et elle nous amène aux mêmes conclu-

sions : la résistance au choc, d'abord stationnaire, décroît assez rapidement dès que la proportion de spiegel dépasse 20 0/0, puis diminue plus lentement au delà de la proportion 33,3 0/0; c'est-à-dire que la résistance au choc, comme la résistance à la traction, diminue quand la teneur en manganèse dépasse une certaine limite, pendant que la teneur en carbone s'élève légèrement et bien que la teneur en silicium se réduise.

En traçant de même la courbe $x''a''b''c''d''$ de représentation des résistances à la flexion, courbe obtenue en portant sur les ordonnées X, A, B, C et D des longueurs Xx'', Aa'', Bb'', Cc'', Dd'' proportionnelles aux résistances à la flexion que nous avons trouvées pour les divers mélanges éprouvés, cette courbe figurera aussi approximativement la résistance à la flexion des mélanges intermédiaires des deux sortes de fontes.

Cette loi de variation $x''a''b''c''d''$ est assez remarquable en ce qu'elle montre la résistance à la flexion ne suivant pas la même loi que les résistances à la traction et au choc. La résistance à la flexion croît d'abord jusqu'un peu au delà de la proportion 20 0/0 spiegel; puis au delà de la proportion 33,3 0/0 spiegel, elle diminue avec rapidité.

Dans la résistance à la flexion, la teneur élevée de manganèse a donc une influence moins sensible que dans les résistances à la traction et au choc; il est vrai que le manganèse durcissant la fonte doit élever sa résistance à la compression et que la résistance à la flexion tient à la fois des résistances à la traction et à la compression, ce qui explique la forme de la courbe dans sa partie $x''a''b''$; puis ensuite dans la partie $c''d''$ de la courbe, la perte de résistance à la traction, par la haute teneur en manganèse, devenant prépondérante, entraîne la décroissance rapide de la résistance à la flexion, caractérisée par cette partie $c''d''$ de la loi de variation.

Enfin, si nous traçons encore sur la même épure une courbe $x'''a'''b'''c'''d'''$ dont les ordonnées Xx''', Aa''', Bb''', Cc''',

Dd''' sont proportionnelles aux degrés de douceur, ou aux volumes de métal enlevé par la meule à ces mélanges de fontes, nous verrons que cette courbe suit encore, mais d'une façon bien plus prononcée, la courbe de résistance à la traction. En effet, à mesure que la proportion de spiegel entrant dans le mélange s'élève, la douceur de la fonte diminue rapidement, bien que cette fonte reste grise très foncée, ou plutôt noire. Au delà de la proportion 33,3 0/0, la douceur diminue plus rapidement encore jusqu'à correspondre presque au degré très dur dans le mélange à 50 0/0 spiegel, malgré la teneur si élevée 4,3 0/0 de carbone, à laquelle doit être cette fonte demeurée noire, à grains moyens, dans les barreaux de 40/ 40 m/m sur lesquels ont porté nos essais à l'usé.

Ici, l'influence du manganèse sur la dureté qu'il communique aux fontes, à partir toutefois d'une certaine teneur, est manifeste, car dans ces fontes le carbone augmentant en même temps que le manganèse, ne peut avoir qu'une action antagoniste, en agissant pour les adoucir.

Les résultats de l'essai à l'usé donnés par ces mélanges de fontes sont certainement dignes de remarque en ce qu'ils montrent que même dans les fontes noires ou surgrises, à gros grains, on peut rencontrer tous les degrés de dureté, ce qui fait bien reconnaître combien ce mode d'épreuve est nécessaire pour apprécier une fonte devant être travaillée; la couleur plus ou moins grise de sa cassure, généralement prise comme indice de sa douceur, pouvant exister aussi bien dans les fontes dures que dans les fontes douces.

Nous avons cru pouvoir attribuer les médiocres résistances des mélanges précédents à l'excès de manganèse et de carbone qu'ils renferment. Voici une série pareille de mélanges dans lesquels la fonte hématite n° III a été remplacée par de la fonte Esch n° II, fonte phosphoreuse, de même nature que les fontes de Lorraine et du Cleveland, si employées, dans certaines fonderies, à cause de leur bas prix. Nous allons

voir que dans ces nouveaux mélanges encore, l'excès de manganèse et de carbone, loin d'améliorer les faibles résistances de ces fontes phosphoreuses, les réduit considérablement, bien que donnant à leur cassure l'aspect noir, à grains moyens ou fins, des meilleures fontes.

Ces mélanges nouveaux furent composés de :

Mélange A′	90	pour cent	Fonte Esch n° II.
	10	—	Fonte Spiegel.
— B′	80	—	Fonte Esch n° II.
	20	—	Fonte Spiegel.
— C′	66,6	—	Fonte Esch n° II.
	33,3	—	Fonte Spiegel.
— D′	50	—	Fonte Esch n° II.
	50	—	Fonte Spiegel.

et subirent, ainsi que la fonte Esch n° II pure, les différentes épreuves ayant fourni les résultats consignés dans le tableau suivant :

DÉSIGNATION des MÉLANGES DE FONTES	RÉSISTANCE A LA TRACTION par millimètre carré	RÉSISTANCE AU CHOC Hauteur de chute du boulet.	RÉSISTANCE A LA FLEXION par millimètre carré.	VOLUME DE MÉTAL ENLEVÉ par usure SUR MEULE EN GRÈS	RETRAIT PAR MÈTRE COURANT	TASSEMENT SUR MASSELOTTES de 62 m/m d'épaisseur.	PROFONDEUR DE TREMPE SUR MASSELOTTES de 62 m/m d'épaisseur.	DENSITÉ
	kg	m	kg	m/m³	m/m	m/m	m/m	
Esch n° II pure.	15,2	0,31	21	3140	9,6	0	0	6,99
Mélange A′. . .	14,8	0,30	18,8	2930	10,8	0	3	7
— B′. . .	14,1	0,26	18,7	2550	12,3	0	8	7,01
— C′. . .	13,2	0,25	22	2280	11,2	1,5	4,5	7,04
— D′. . .	9	0,225	17,8	2050	11,1	0,5	3	6,98

Les cassures des barreaux d'essais et celle de la masselotte coulée en coquille avec chacun de ces mélanges et avec la fonte Esch n° II pure, ont donné lieu aux remarques suivantes :

La cassure des barreaux d'épreuves coulés avec fonte Esch

n° II était grise, à grains moyens et brillants; un peu plus noire avec le mélange A'; à grains plus noirs, plus serrés et plus fins avec les mélanges B' et C'; à grains plus noirs encore, moyens et brillants avec le mélange D'.

La cassure de la masselotte coulée en coquille, avec la fonte Esch n° II pure, n'a pas montré trace de trempe; cette cassure était gris clair, à grains excessivement serrés; un léger gonflement s'était produit à sa surface, d'ailleurs sans piqûres.

La cassure de la masselotte coulée en coquille, avec le mélange A' était grise, à grains fins et serrés, montrait une trempe d'environ $3^m/^m$ de profondeur; sa surface, un peu ondulée, ne laissait apercevoir ni tassement ni gonflement.

La cassure de la masselotte coulée en coquille avec le mélange B' était noire, avec quelques taches blanchâtres venant tigrer son grain noir et fin; une croûte graphiteuse existait à sa surface, ne laissant paraître ni tassement ni gonflement.

La profondeur de la trempe, environ $8^m/^m$, était assez mal accusée à cause du prolongement cristallin de cette trempe à lamelles miroitantes, venant se perdre dans le noir du restant de la cassure.

La cassure de la masselotte coulée en coquille avec le mélange C' était grise, truitée de blanc, à grains fins et brillants. Trempe à peine sensible de 3 à $5^m/^m$ de profondeur; cette trempe reste grisâtre, à cause du graphite qu'elle contient; au bord, dans la partie franchement trempée, la cassure est lamelleuse, miroitante plutôt que rayonnée. Retassement de $1^m/^m5$ environ au milieu de la surface de cette masselotte.

Enfin, la cassure de la masselotte coulée en coquille avec le mélange D' était gris foncé, à grains fins et brillants, avec quelques taches mouchetant cette cassure. Trempe 2,5 à $3^m/^m$ seulement, se perdant dans le gris, et miroitante sur les bords. Surface légèrement retassée de $0,5^m/^m$ seulement.

Ainsi, dans ces fontes phosphoreuses, le manganèse a d'abord amené une trempe assez profonde; puis, malgré son excès, cette profondeur de trempe s'est amoindrie de plus en plus. L'excès de carbone apporté par la fonte spiegel, avec le manganèse est passé de plus en plus à l'état graphiteux, au lieu de demeurer à l'état combiné, comme on aurait pu l'attendre de l'influence du manganèse existant en si grande proportion.

La composition moyenne de la fonte Esch n° II, employée dans ces mélanges, est :

Carbone total	3,08	0/0
Silicium.	2,2	—
Phosphore	1,8	—
Manganèse	0,38	—

Celle de la fonte spiegel étant encore :

Carbone total.	5,1	0/0
Manganèse	7,1	—
Silicium	0,4	—

La fusion de ces mélanges opérée au creuset n'ayant pu avoir qu'une très faible action dénaturante, ces mélanges ont dû conserver à peu près le carbone, le silicium, le manganèse et le phosphore existant dans les fontes initiales; par suite la teneur de ces mélanges doit être approximativement :

A'	Carbone total	3,08×0,9 + 5,1×0,1	= 2,772 + 0,51	= 3,282 C
	Silicium	2,2 × 0,9 + 0,4×0,1	= 1,98 + 0,04	= 2,02 *Si*
	Phosphore	1,8 × 0,9	= 1,62	= 1,62 P*h*
	Manganèse	0,38×0,9 + 7,1×0,1	= 0,342 + 0,71	= 1,052 M*n*
B'	Carbone total	3,08×0,8 + 5,1×0,2	= 2,464 + 1,02	= 3,484 C
	Silicium	2,2 × 0,8 + 0,4×0,2	= 1,76 + 0,08	= 1,84 S*i*
	Phosphore	1,8 × 0,8	= 1,44	= 1,44 P*h*
	Manganèse	0,38×0,8 + 7,1×0,2	= 0,304 + 1,42	= 1,724 M*n*
C'	Carbone total	3,08×0,66 + 5,1×0,33	= 2,05 + 1,7	= 3,75 C
	Silicium	2,2 × 0,66 + 0,4×0,33	= 1,47 + 0,134	= 1,604 S*i*
	Phospore	1,8 × 0,66	= 1,2	= 1,2 P*h*
	Manganèse	0,38×0,66 + 7,1×0,33	= 0,253 + 2,36	= 2,613 M*n*

D′	Carbone total	3,08×0,5 +5,1×0,5	=1,54 +2,55	=4,09	C
	Silicium	2,2 ×0,5 +0,4×0,5	=1,1 +0,2	=1,3	Si
	Phosphore	1,8 ×0,5	=0,9	=0,9	Ph
	Manganèse	0,38×0,5 +7,1×0,5	=0,19 +3,55	=3,74	Mn

Représentons encore graphiquement les teneurs en carbone, silicium, phosphore et manganèse de ces divers mélanges, en prenant un axe d'abscisse X′Y′ égal à 100m/m et portant sur cet axe des longueurs X′A′ = 10m/m, X′B′ = 20m/m, X′C′ = 33,3m/m, X′D′ = 50m/m, pour représenter la proportion de spiegel entrant dans ces mélanges A′, B′, C′, D′; élevons des ordonnées en chacun des points A′, B′, C′, D′ et aux points X′ et Y′ *(pl. I, fig. 2)*, portons sur ces ordonnées des longueurs proportionnelles aux teneurs en carbone, silicium, phosphore et manganèse que nous voulons représenter; les ordonnées extrêmes correspondront : X′, à la fonte Esch n° II pure et Y′ à la fonte spiegel.

Réunissant par une ligne continue chacun des points de ces ordonnées correspondant aux teneurs en carbone, par une deuxième ligne continue, les points correspondant aux teneurs en silicium, par une troisième ligne continue les points de ces ordonnées correspondant aux teneurs en phosphore et, enfin, par une quatrième ligne continue les points limitant les ordonnées représentant les teneurs en manganèse, nous trouverons ici encore que ces lignes de représentation CC, *SiSi*, *PhPh*, *MnMn*, ainsi obtenues, sont des lignes droites.

Sur cette même épure *(pl. I, fig. 2)* et sur les ordonnées correspondant à chacune des fontes essayées, portons à partir de X′Y′ des longueurs X′*x*, A′*a*, B′*b*, C′*c*, D′*d* respectivement proportionnelles aux résistances à la traction, par millimètre carré, de la fonte Esch n° II et des mélanges A′, B′, C′, D′. La courbe *xabcd*, ayant ces longueurs comme ordonnées, représentera non seulement la résistance à la traction de ces divers mélanges de fontes; mais encore assez approximativement celle des mélanges intermédiaires produits en

choisissant d'autres proportions que celles de 10, 20, 33,3 et 50 0/0 de spiegel existant dans les mélanges éprouvés.

Cette nouvelle courbe *xabcd* nous montre encore que la résistance à la traction, loin de gagner par l'augmentation des teneurs en carbone et en manganèse, décroît d'abord insensiblement, puis de plus en plus, à mesure que la proportion de spiegel employé s'élève ; c'est-à-dire à mesure que la fonte produite renferme plus de manganèse et de carbone, bien que la proportion de phosphore et de silicium contenue dans ces fontes aille en diminuant.

La courbe $x'a'b'c'd'$ obtenue en prenant pour ordonnées des longueurs $X'x'$, $A'a'$, $B'b'$, $C'c'$, $D'd'$ respectivement proportionnelles aux résistances moyennes au choc trouvées en éprouvant ces diverses fontes, représentera aussi, à peu près, la variation des résistances au choc dans les mélanges intermédiaires.

Comme la courbe *xabcd* des résistances à la traction, cette courbe $x'a'b'c'd'$ nous montre les résistances au choc allant en décroissant à mesure que les teneurs en manganèse et en carbone augmentent, et bien que les teneurs en phosphore et en silicium diminuent.

Traçant sur cette même épure la courbe $x''a''b''c''d''$ ayant pour ordonnées $X'x''$, $A'a''$, $B'b''$, $C'c''$, $D'd''$, des longueurs prises proportionnelles aux résistances à la flexion trouvées dans l'épreuve de ces fontes, cette courbe $x''a''b''c''d''$ représentera encore approximativement les variations de résistance à la flexion des mélanges intermédiaires que l'on aurait pu former en employant des proportions autres que celles qui ont été adoptées dans les mélanges de fonte Esch n° II et de spiegel.

Cette loi $x''a''b''c''d''$ de variation des résistances à la flexion par millimètre carré de section rompue, nous permet de reconnaître que ces résistances décroissent d'abord quand la proportion de spiegel s'élève ; puis, lorsque cette dernière proportion

dépasse 20 0/0, la résistance à la flexion se relève pour retomber de nouveau au delà de la proportion 33,3 0/0.

Avec les mélanges de fonte hématite et de spiegel, nous avions aussi trouvé ce relèvement de résistance à la flexion; mais à partir de l'origine du mélange de fonte hématite avec le spiegel; tandis qu'ici, ce relèvement ne part que d'assez loin et après que la teneur en manganèse est parvenue à un chiffre assez élevé, que les teneurs en silicium et en phosphore ont été réduites quelque peu. Le relèvement total de la résistance à la flexion est aussi moins considérable dans ce dernier cas.

Ici encore, nous croyons que ce relèvement de la résistance à la flexion doit être attribué à l'augmentation de la résistance à la compression que doivent éprouver ces fontes phosphoreuses, quand la proportion de manganèse qui y est introduite est élevée; et que ce relèvement doit subsister tant que l'excès de manganèse et de carbone ne vient pas trop nuire à la résistance à la traction; à partir d'une certaine limite de teneur en manganèse, limite variable dans ces fontes phosphoreuses avec la proportion des autres éléments qu'elles contiennent, la faible résistance à la traction l'emporte et la résistance à la flexion décroît.

Si enfin, sur cette épure *(pl. I, fig. 2)* nous traçons encore la courbe $x'''a'''b'''c'''d'''$ ayant pour ses ordonnées $X'x'''$, $A'a'''$, $B'b'''$, $C'c'''$, $D'd'''$, des longueurs proportionnelles aux volumes de fonte enlevés par la meule, dans l'épreuve de la douceur de ces mélanges, nous verrons que cette courbe, de représentation de la variation du degré de douceur des fontes obtenues, suit encore d'une façon plus ou moins approchée les courbes de résistance à la traction et au choc; c'est-à-dire que la douceur de ces mélanges de fonte phosphoreuse avec spiegel diminue quand la teneur en manganèse augmente; mais, cependant, cette diminution est loin d'être aussi rapide que dans les mélanges de fonte hématite avec spiegel, sur-

tout après que la proportion de cette dernière fonte dépasse 33,3 0/0.

Cette différence dans la décroissance du degré de douceur ne peut évidemment provenir que du phosphore qui, à partir d'une certaine proportion de manganèse, avec lequel il se rencontre dans la fonte, vient combattre l'action durcissante de ce manganèse, probablement en l'empêchant d'agir sur la fonte pour favoriser la dissolution du carbone qu'elle contient en proportion si élevée. On en trouverait la confirmation dans ce fait assez remarquable, qu'au delà du mélange à 20 0/0 spiegel avec la fonte phosphoreuse, non seulement la profondeur de la trempe en coquille, mais encore la densité vont en décroissant, tandis que la teneur en manganèse augmente et celles en phosphore et en silicium diminuent.

En définitive, la fonte spiegel, loin d'améliorer les fontes hématites et les fontes phosphoreuses auxquelles on peut la mélanger, réduit leur résistance à la traction et au choc, et d'autant plus, qu'elle entre en proportion plus considérable dans ces mélanges,

Dans bien des fonderies, en Angleterre surtout, où l'on emploie sur une large échelle les fontes noires à gros grains d'Écosse, et les fontes grises du Cleveland, si peu résistantes, pour relever la ténacité des moulages produits, on ajoute à ces fontes, pendant leur fusion au cubilot, des rognures de fer ou des ferrailles qui ont pour effet de décarburer partiellement les fontes dans lesquelles elles sont introduites et de dissoudre leur excès de graphite.

Le résultat de cette décarburation partielle est d'augmenter dans une proportion notable la ténacité des fontes avec lesquelles ces ferrailles sont fondues, en élevant le numéro de leur classification et les rapprochant de la texture correspondant au maximum de la résistance pouvant être obtenue d'une fonte de nature donnée.

Il m'a été facile de le vérifier dans une série méthodique

d'expériences, analogues aux précédentes, et portant sur la même fonte hématite n° III mélangée non à des ferrailles de fer qui, plus ou moins oxydées, exercent une décarburation énergique et plus ou moins uniforme ; mais avec diverses proportions de chutes d'acier corroyé, non oxydées, plus pures, plus faciles à fondre que le fer et donnant un mélange plus homogène, plus régulier.

Ces épreuves ont porté sur les mélanges suivants :

Mélange N { 90 pour cent Fonte hématite n° III,
10 — Acier corroyé ;

O { 80 — Fonte hématite n° III,
20 — Acier corroyé ;

P { 66,6 — Fonte hématite n° III,
33,3 — Acier corroyé ;

Q { 50 — Fonte hématite n° III,
50 — Acier corroyé

mélanges qui ont fourni les résultats consignés dans le tableau ci-dessous :

DÉSIGNATION des MÉLANGES DE FONTES	RÉSISTANCE A LA TRACTION par millimètre carré.	RÉSISTANCE AU CHOC Hauteur de chute du boulet.	RÉSISTANCE A LA FLEXION par millimètre carré.	VOLUME DE MÉTAL ENLEVÉ par usure SUR MEULE EN GRÈS.	RETRAIT PAR MÈTRE COURANT.	TASSEMENT SUR MASSELOTTE de 62 m/m d'épaisseur.	PROFONDEUR DE TREMPE SUR MASSELOTTE de 62 m/m d'épaisseur.	DENSITÉ
	k	m	kg	m/m³	m/m	m/m	m/m	
Hématite n° III pure .	17,1	0,37	19,69	3780	10,5	0	4	7,01
Mélange N. . .	21,7	0,44	27,2	3750	10,9	0	5,5	7,14
— O. . .	24,3	0,50	35,27	3520	11,0	2,50	9	7,25
— P. . .	23,4	0,55	41,83	1396	13,2	3,75	62	7,3
— Q. . .	19,8	0,34	32,83	480	20	4	62	7,4

La cassure des barreaux d'essai et celle de la masselotte coulée en coquille, avec chacun de ces mélanges, ont donné lieu aux observations suivantes.

mélanges N et O ont produit des barreaux à cassure gri à grains très serrés, avec légères traces de truité et q ues taches blanches dans le mélange O. Les masselottes es en coquille montraient encore de la fonte grise dans lus grande partie de leur cassure, cette fonte grise se dant insensiblement, sans transition, dans la partie inférure trempée qui était blanc fibreux, un peu rayonnée ême au-dessus de la partie blanche, dans le gris.

La partie supérieure de la masselotte provenant du mélange N ne laissait apercevoir à sa surface ni tassement, ni gonflement; mais celle du mélange O était assez fortement retassée.

Le mélange P a donné des barreaux de 40/40 m/m à cassure gris-clair, grains très fins et très arrachés; les barrettes d'épreuve à la traction, de 16/20 m/m dans leur section de rupture, étaient à cassure blanche, rayonnée, avec liséré noir sur les bords.

La masselotte coulée en coquille a donné de la fonte blanche fibreuse dans toute sa section, sauf quelques points gris disséminés autour d'une tache cristalline (en forme de fougère) au milieu, vers la partie supérieure. Fort retassement au milieu de sa surface supérieure.

Le mélange Q a produit des barreaux d'essai en fonte blanche, à grains fins et arrachés, avec taches de cristallisation au centre de la cassure des barreaux de 40/40 m/m.

La masselotte coulée en coquille a montré une fonte blanche, à texture grenue dans toute sa section; elle était à peine cristalline sur ses bords. De très fortes et nombreuses piqûres caverneuses existaient à sa surface supérieure très retassée.

Les chutes d'acier employées dans ces mélanges possédaient une teneur moyenne de 0,6 0/0 de carbone; la fusion ayant été effectuée au creuset, la composition de ces mélanges a dû être approximativement :

Mélange N	Carbone tot.	3,5 × 0,9 + 0,6 × 0,1	= 3,2 C
	Manganèse	2,5 × 0,9	= 2,25 Mn
	Silicium	2,15 × 0,9	= 1,935 Si
— O	Carbone tot.	3,5 × 0,8 + 0,6 × 0,2	= 2,92 C
	Manganèse	2,5 × 0,8	= 2 Mn
	Silicium	2,15 × 0,8	= 1,72 Si
— P	Carbone tot.	3,5 × 0,66 + 0,6 × 0,33	= 2,53 C
	Manganèse	2,5 × 0,66	= 1,66 Mn
	Silicium	2,15 × 0,66	= 1,43 Si
— Q	Carbone tot.	3,5 × 0,5 + 0,6 × 0,5	= 2,05 C
	Manganèse	2,5 × 0.5	= 1,25 Mn
	Silicium	2.15 × 0,5	= 1,075 Si

Représentons encore graphiquement les teneurs approximatives en carbone, manganèse et silicium de ces mélanges, en prenant un axe d'abscisses XY de longueur égale égale à 100 m/m *(pl. I, fig. 3)* et portant sur cet axe d'abscisses, à partir de X, des longueurs XN, XO, XP, XQ respectivement égales à 10, 20, 33,3, 50 m/m correspondant à la proportion d'acier entrant dans ces mélanges; les ordonnées X, N, O, P, Q et Y nous serviront, comme dans les épures précédentes, à représenter à la fois les diverses résistances relatives à chaque mélange et leur teneur en carbone, manganèse et silicium.

Portant à partir de l'axe XY et sur chacune des ordonnées correspondantes, des longueurs proportionnelles aux quantités de carbone, de manganèse et de silicium contenues dans la fonte hématite nº III dont l'ordonnée correspondante est celle élevée en X, et dans les mélanges N, O, P, Q; puis portant encore sur l'ordonnée Y correspondant à l'acier une longueur proportionnelle à sa teneur en carbone, et joignant les points relatifs aux teneurs de même nature, les lignes de représentation du carbone, du manganèse et du silicium, dans ces mélanges de fontes, seront droites et iront en se rapprochant de plus en plus de l'axe d'abscisse XY; donc ces mé-

langes deviennent d'autant plus purs d'éléments étrangers que la proportion d'acier qui y est introduite est plus considérable.

Portons sur les ordonnées de cette épure des longueurs X*x*, N*n*, O*o*, P*p*, Q*q* proportionnelles aux chiffres de résistance à la traction, par millimètre carré, que nous avons trouvés pour chacun des mélanges ; la courbe *xnopq*, ayant pour ordonnées ces longueurs, représentera la marche des résistances à la traction dans les mélanges de fonte hématite n° III et d'acier, en diverses proportions.

Elle nous montre que la résistance primitive s'élève notablement à mesure que la quantité d'acier introduite dans cette fonte s'accroît ; mais cela seulement jusque vers la proportion de 20 0/0 acier, qui correspond à peu près au maximum ; au delà de cette proportion, la résistance diminue de plus en plus sensiblement ; toutefois pour le mélange 50 0/0 fonte hématite n° III avec 50 0/0 acier, elle est encore bien supérieure à la résistance de la fonte hématite n° III pure.

La courbe *x'n'o'p'q'*, obtenue de la même manière, en prenant pour ordonnées des longueurs proportionnelles aux chiffres de résistance au choc trouvés dans l'épreuve de ces mélanges de fonte, nous donne approximativement la résistance au choc des mélanges intermédiaires et nous montre que cette résistance croît vivement et de beaucoup par l'addition d'acier à la fonte hématite n° III, et cela jusque vers la proportion 30 0/0 d'acier, correspondant à peu près au maximum de cette résistance ; au delà de cette proportion, la résistance au choc diminue rapidement.

La courbe *x''n''o''p''q''* tracée en prenant pour ordonnées des longueurs proportionnelles aux chiffres de la résistance à la flexion trouvés dans l'essai de ces mélanges de fonte, montre encore que la résistance à la flexion s'élève vivement à mesure que la quantité d'acier employée dans le mélange s'accroît, et que le maximum de résistance à la flexion est obtenu par une proportion d'acier un peu supérieure à

33,3 0/0 ; au delà, cette résistance diminue rapidement, tout en restant encore supérieure à celle de la fonte hématite n° III pure, dans le mélange à 50 0/0 acier avec 50 0/0 fonte hématite n° III.

Ces courbes de résistances, prises dans leur ensemble, prouvent donc que le maximum de ténacité des fontes est loin de correspondre à leur maximum de carburation, — ce que l'on croit trop généralement, — puisqu'ici nous voyons correspondre à une teneur en carbone d'environ

2,92 0/0 le maximum de résistance à la traction ;

2,53 0/0 le maximum de résistance au choc ;

2,53 0/0 le maximum de résistance à la flexion.

Si les courbes étaient prolongées jusqu'à l'ordonnée Y, nul doute que l'on ne trouve un relèvement aussi considérable que rapide, dès que la proportion d'acier entrant dans ces mélanges en presque totalité, réduit leur teneur en carbone au point que le produit obtenu soit de l'acier très dur (1), à la teneur 1,75 à 1,50 0/0 ; dur depuis 1,50 jusqu'à 1 0/0, pour s'infléchir et redescendre de nouveau, quand l'acier devient ordinaire, depuis 1 jusqu'à 0,6 0/0.

Mais si, dans ces mélanges de fonte hématite et d'acier, les diverses résistances s'élèvent considérablement, jusqu'à ce que la proportion d'acier atteigne 33,3 0/0, par contre, la douceur de la fonte obtenue se perd aussi rapidement, ainsi que le montre la courbe $x'''n'''o'''p'''q'''$ construite sur les ordonnées Xx''', Nn''', Oo''', Pp''', Qq''' proportionnelles aux volumes de fonte enlevés, par usure sur la meule, de chacun de ces mélanges.

---

(1) En Angleterre, on admet le classement suivant : en dessous de 1/4 0/0 de carbone, le métal est appelé fer doux ; de 1/4 à 1/3 0/0, on a le demi-acier ; de 1/3 à 1/2 0/0 l'acier doux ; de 1/2 à 1 0/0, l'acier ordinaire ; de 1 à 1 3/4 0/0 l'acier dur et l'acier très dur, de 1 3/4 à 2 0/0, métal ni acier, ni fonte, impropre à tout travail ; à environ 2 0/0 commence la fonte proprement dite. Ces teneurs ne sont pas considérées comme absolues, les limites varient suivant le degré de pureté du métal.

Jusqu'au mélange O, correspondant à 20 0/0 d'acier, la fonte quoique perdant quelque peu de sa douceur primitive est restée douce, d'un travail facile à la lime; mais au delà cette douceur disparaît avec rapidité. Dans le mélange, à 33,3 0/0 d'acier, la fonte est devenue dure, elle le devient beaucoup plus encore dans le mélange Q, à 50 0/0 acier.

Pour des pièces devant être ajustées à la lime, le mélange P deviendrait presque complètement inutilisable à cause de sa dureté; à plus forte raison le mélange Q ne pourrait-il être employé.

Il n'en est pas de même des mélanges N, à 10 0/0 acier et O, à 20 0/0 acier; ce dernier surtout donne non seulement un produit doux, mais encore une fonte de ténacité remarquable, possédant à la fois une résistance élevée à la traction, au choc et à la flexion.

De tous les mélanges que nous avons étudiés jusqu'ici, ce mélange O est sans contredit le meilleur; c'est celui qui, à égale douceur de la fonte, donne le maximum de résistance; il est même en tous points supérieur à la fonte Hartguss de Grüson, ainsi qu'on peut le remarquer par la comparaison des résultats suivants :

DÉSIGNATION DES FONTES	RÉSISTANCE A LA TRACTION par millimètre carré.	RÉSISTANCE AU CHOC Hauteur de chute du boulet.	RÉSISTANCE A LA FLEXION par millimètre carré.	VOLUME DE MÉTAL ENLEVÉ par usure SUR MEULE EN GRÈS	TASSEMENT SUR MASSELOTTE de 62 m/m d'épaisseur.	PROFONDEUR DE TREMPE SUR MASSELOTTE de 62 m/m d'épaisseur.	RETRAIT PAR MÈTRE COURANT	DENSITÉ
	kg	m	kg	m/m3	m/m	m/m	m/m	
Hartguss Grüson	22,7	0,46	33,39	3000	4,5	8	11,4	7,12
Mélange O . . .	24,3	0,50	35,27	3520	2,5	9	11,6	7,25

D'après cela, il semble évident que la grande ténacité de la fonte Hartguss de Grüson provient d'un mélange de fonte hématite, moyennement maganésifère avec du fer ou de l'acier, plutôt qu'avec de la fonte spiegel; cependant, il serait possible

qu'on pût l'obtenir aussi par un mélange de fonte hématite avec de la fonte spiegel et du fer ou de l'acier.

Avant d'entrer dans cette recherche, voyons encore, comme nous l'avons déjà fait pour la fonte spiegel, si l'emploi d'acier en mélange avec les fontes phosphoreuses peut améliorer leur résistance et dans quelle mesure se produirait cette amélioration.

Pour cette étude sur les fontes phosphoreuses alliées en proportion plus ou moins grande avec de l'acier, j'ai employé les mêmes proportions que dans les mélanges précédents, en substituant à la fonte hématite n° III, de la fonte Esch n° I, identique à celle qui avait déjà servi aux recherches faites sur mélanges de fonte phosphoreuse avec spiegeleisen.

Les nouveaux mélanges soumis aux épreuves furent composés de :

Mélange N′	90	pour cent	Fonte Esch n° II,	
	10	—	Acier;	
— O′	80	—	Fonte Esch n° II,	
	20	—	Acier;	
— P′	66,6	—	Fonte Esch n° II,	
	33,3	—	Acier;	
— Q′	50	—	Fonte Esch n° II,	
	50	—	Acier.	

Ces mélanges ont donné les résultats suivants :

DÉSIGNATION DES MÉLANGES DE FONTES	RÉSISTANCE A LA TRACTION par millimètre carré.	RÉSISTANCE AU CHOC hauteur de chute du boulet.	RÉSISTANCE A LA FLEXION par millimètre carré.	VOLUME DE MÉTAL ENLEVÉ par usure sur meule en grès.	RETRAIT PAR MÈTRE COURANT	TASSEMENT SUR MASSELOTTE de 62 m/m épaisseur.	PROFONDEUR DE TREMPE sur masselottes de 62 m/m épaisseur.	DENSITÉ
	kg	m	kg	m/m³	m/m	m/m	m/m	
Fonte Esch n° II.	15,2	0,31	21	3140	9,6	0	0	6,99
Mélange N′.	16,3	0,325	21,6	1630	11,1	0	3	7,12
— O′.	18,8	0,35	29,5	1100	12,5	5	62	7,25
— P′.	23,2	0,33	28,5	1010	16	5	62	7,58
— Q′.	19,8	0,32	22,9	760	16	6	62	7,55

Les barreaux d'épreuves et les masselottes coulées en coquille avec ces mélanges ont donné lieu aux observations suivantes :

La masselotte coulée en coquille avec le mélange N′ était à cassure gris clair, légèrement truité, à grains très fins, elle avait pris une trempe de 2 à $3^{m}/^{m}$ de profondeur seulement, la surface supérieure de cette masselotte était légèrement gonflée, sans piqûres.

Les barreaux de $40/40^{m}/^{m}$ d'essai à la flexion et au choc, ainsi que les barrettes d'essai à la traction, étaient à cassure grise, à grains fins et serrés dans leur section de rupture.

Le mélange O′ a donné des barreaux de $40/40^{m}/^{m}$ présentant une cassure à grains fins, gris clair, avec taches blanches disséminées. Les barrettes d'essai à la traction étaient blanc rayonné, avec quelques points gris, dans leur section de rupture et la masselotte coulée en coquille s'est trouvée aussi à cassure totalement blanche, rayonnée, avec tache de cristallisation et légère cavité de tassement dans le haut au milieu ; quelques points gris environnaient la tache de cristallisation. Tassement très prononcé au milieu de la surface supérieure de cette masselotte.

Le mélange P′ a fourni des barreaux de $40/40^{m}/^{m}$ à cassure blanche et grenue, avec quelques points gris et moyens parsemant toute la cassure. La section rompue des barrettes essayées à la traction était blanche, rayonnée ; et la masselotte coulée en coquille était de texture à grains très fins, comme celle de l'acier fondu, mais un peu plus grisâtre. Comme dans la masselotte provenant du mélange O′, une tache de cristallisation et une légère cavité de tassement existaient au milieu de la masselotte du mélange P′ et dans le haut de sa cassure un peu squilleuse. Une dépression très prononcée s'était formée par tassement au milieu de sa surface supérieure.

Le mélange Q' a produit des barreaux de 40/40$^{m}/^{m}$ à cassure totalement blanche, à grains fins et aciéreux, mais de couleur légèrement grise; les barrettes d'essai à la traction ont présenté la même texture dans leur section rompue.

La masselotte coulée en coquille a donné de la fonte blanche grenue, à grains fins comme ceux de l'acier, un peu plus ternes et grisâtres; elle avait une légère tache de cristallisation au milieu, vers le haut de la cassure; mais sans cavité de tassement. La surface supérieure a présenté une dépression plus considérable que celle des masselottes précédentes et quelques piqûres assez profondes.

En résumé, dans ces mélanges coulés en coquille, nous ne trouvons aucune trempe convenable produite; la fonte passe au gris clair, légèrement truité, à grains fins, ou devient complètement blanche; elle subit un tassement considérable.

La composition moyenne de ces mélanges fondus au creuset a été approximativement

Mélange N'	Carbone total	3,08 × 0,9	+ 0,6 × 0,1	= 2,83 C
	Silicium	2,2 × 0,9		= 1,98 S*i*
	Phosphore	1,8 × 0,9		= 1,62 P*h*
	Manganèse	0,38 × 0,9		= 0,34 M*n*
— O'	Carbone total	3,08 × 0,8	+ 0,6 × 0,2	= 2,58 C
	Silicium	2,2 × 0,8		= 1,76 S*i*
	Phosphore	1,8 × 0,8		= 1,44 P*h*
	Manganèse	0,38 × 0,8		= 0,03 M*n*
— P'	Carbone total	3,08 × 0,66	+ 0,6 × 0,33	= 2,25 C
	Silicium	2,2 × 0,66		= 1,47 S*i*
	Phosphore	1,8 × 0,66		= 1,2 P*h*
	Manganèse	0,38 × 0,66		= 0,253 M*n*
— Q'	Carbone total	3,08 × 0,5	+ 0,6 × 0,5	= 1,84 C
	Silicium	2,2 × 0,5		= 1,1 S*i*
	Phosphore	1,8 × 0,5		= 0,9 P*h*
	Manganèse	0,38 × 0,5		= 0,19 M*n*

Pour représenter graphiquement ces mélanges et leurs résistances diverses, prenons encore *(pl. I, fig. 4)* un axe d'abscisses X'Y' de longueur égale à $100^{m}/^{m}$ et sur cet axe, portons des longueurs X'N', X'O', X'P', X'Q' respectivement égales à $10^{m}/^{m}$, $20^{m}/^{m}$, $33^{m}/^{m}3$, et $50^{m}/^{m}$, et proportionnelles aux quantités d'acier entrant dans ces mélanges N', O', P', Q'; élevons des ordonnées en chacun des points N', O', P', Q' et aussi aux extrémités X' et Y' de l'axe d'abscisses. Sur ces ordonnées, portons des longueurs proportionnelles aux teneurs en carbone, silicium, phosphore et manganèse de ces mélanges. Les ordonnées extrêmes élevées en X' et en Y' correspondront, la première à la fonte Esch n° II pure, et la dernière à l'acier.

Réunissant par une ligne continue chacun des points de ces ordonnées correspondant aux teneurs en carbone, par une autre ligne continue les points correspondant aux teneurs en silicium, par une troisième ligne continue, les points de ces ordonnées correspondant aux teneurs en phosphore et par une quatrième ligne continue, les points de ces ordonnées représentant les teneurs en manganèse, nous trouverons ici encore que les 4 lignes de représentation CC, S*i*S*i*, P*h*P*h*, M*n*M*n*, ainsi obtenues, sont des lignes droites; la décroissance de ces teneurs étant proportionnelle à l'accroissement de la proportion d'acier introduite dans ces mélanges.

Portons sur les ordonnées de cette épure des longueurs X'*x*, N'*n*, O'*o*, P'*p*, Q'*q* respectivement proportionnelles aux résistances à la traction, par millimètre carré, de la fonte Esch n° II et des mélanges N', O', P', Q'; la courbe *xnopq* ayant ces longueurs comme ordonnées, représentera non seulement la résistance à la traction de ces divers mélanges de fonte phosphoreuse avec de l'acier, mais encore assez approximativement celle des mélanges intermédiaires produits avec d'autres proportions que celles de 10, 20, 33,3 et 50 0/0 d'acier employées dans ces mélanges.

Cette courbe *xnopq* nous montre que la résistance à la traction de la fonte primitive s'élève notablement à mesure que la quantité d'acier mêlée à cette fonte s'accroît; mais cela seulement jusque vers la proportion 33,3 0/0 d'acier donnant à peu près le maximum; au delà, la résistance à la traction diminue de plus en plus sensiblement; toutefois dans le mélange 50 0/0 fonte Esch n° II et 50 0/0 acier, elle est encore bien supérieure à celle de la fonte Esch n° II pure.

La courbe $x'n'o'p'q'$ obtenue en prenant pour ordonnées des longueurs proportionnelles aux chiffres de résistance au choc trouvés dans l'épreuve de ces mélanges, nous donne d'une façon approximative la résistance au choc des mélanges intermédiaires et nous montre que cette résistance stationnaire d'abord, s'élève lentement et présente son maximum vers le mélange à 20 0/0 d'acier, puis décroît lentement ensuite. Dans le mélange à 50 0/0 d'acier, la résistance au choc est encore supérieure à celle de la fonte Esch n° II pure.

La courbe $x''n''o''p''q''$ tracée en prenant pour ordonnées des longueurs proportionnelles aux chiffres de résistance à la flexion, calculés par millimètre carré de section rompue, d'après les résultats obtenus dans l'essai de ces mélanges, nous montre aussi que la résistance à la flexion, stationnaire d'abord, s'élève rapidement pour atteindre son maximum un peu au delà de la proportion 20 0/0 acier; ensuite, que cette résistance diminue progressivement, pour rester cependant supérieure à la résistance de la fonte Esch n° II pure, dans le mélange de 50 0/0 acier avec 50 0/0 de cette fonte.

La courbe $x'''n'''o'''p'''q'''$ construite en prenant pour ordonnées des longueurs proportionnelles aux volumes de métal enlevés dans les épreuves de ces mélanges à la meule, nous montre combien est rapide la perte de douceur de la fonte phosphoreuse dès qu'on la mélange même avec une faible quantité d'acier; et cependant le mélange O', à 20 0/0 d'a-

cier, donne encore de la fonte gris-clair; ce n'est qu'entre les mélanges O′ et P′ que la fonte devient blanche (1). Malgré cela, dès le mélange N′, elle devient inutilisable pour les pièces ajustées, à cause de sa dureté trop grande.

Ces fontes phosphoreuses durcissent et blanchissent donc bien plus rapidement que les fontes hématites, même malgré l'élévation de la teneur en manganèse de ces dernières, laquelle est, il est vrai, compensée, en partie, par la teneur moyennement élevée en carbone qui accompagne généralement le manganèse dans ces fontes.

Prises dans leur ensemble, les courbes de représentation graphique des résistances à la traction, au choc et à la flexion, prouvent donc encore que le maximum de ténacité des fontes phosphoreuses ne correspond pas, à beaucoup près, à leur maximum de carburation; avec ces fontes, en effet, nous voyons le maximum des résistances correspondre :

Pour la traction, à une teneur en carbone d'environ 2,3 0/0.
Pour le choc — — — 2,6 —
Pour la flexion — — — 2,45 —

Si, pour obtenir une comparaison plus facile, nous transportons *(fig. 5, 6, 7 et 8, pl. I)* sur 4 épures différentes les courbes de résistance et de douceur des mélanges de fonte hématite n° III avec l'acier, et, celles de résistance et de douceur des mélanges de fonte Esch n° II avec l'acier, nous trouverons en comparant deux à deux les courbes de même représentation et relatives à deux séries de mélanges de fontes. qui ne diffèrent sensiblement de l'une à l'autre que par la teneur élevée en manganèse de la fonte hématite n° III, entrant dans une série de mélanges et par la teneur, presque

(1) Le passage de fonte grise n° II à fonte blanche n° V, dû la décarburation produite par l'addition de 20 0/0 d'acier, s'explique par la faible carburation de la fonte Esch n° II, et en général de toutes les fontes contenant une quantité importante de phosphore; aussi ces fontes ne supportent-elles, sans blanchir, qu'un nombre fort restreint de fusions successives.

aussi élevée en phosphore, que possède la fonte Esch n° II entrant dans l'autre série de mélanges, que : la résistance à la traction, un peu supérieure dans la fonte hématite n° III au départ des courbes *(pl. I, fig. 5)*, après s'être écartée, vient se rapprocher et même se confondre, à partir du mélange P, avec la courbe de résistance à la traction de la série des mélanges dans lesquels entre la fonte Esch n° II et vers le mélange P', à 33,3 0/0 d'acier. Ceci prouverait que, pour ce mode de résistance, l'influence du phosphore tend à disparaître, ainsi que celle du manganèse, dans les fontes peu carburées, dès que la teneur du phosphore s'abaisse jusque 1 0/0 environ et que la teneur du manganèse descend jusqu'à environ 1,50 0/0.

La résistance au choc de la fonte hématite n° III est notablement supérieure à celle de la fonte Esch n° II; aussi le point de départ des courbes *(pl. I, fig. 6)* diffère-t-il sensiblement. Tandis que la courbe de résistance au choc s'élève peu et redescend peu ensuite, dans les mélanges de fonte Esch n° II, celle des mélanges de fonte hématite n° III s'élève considérablement et, de l'écartement qui en résulte, on doit conclure d'une part, que le manganèse augmente d'une façon remarquable la résistance au choc, tandis que d'autre part, le phosphore altère profondément cette résistance dans les fontes moyennement carburées. Cependant la courbe des mélanges de fonte hématite n° III, en arrivant au mélange à 33,3 0/0 d'acier, retombe plus rapidement encore qu'elle ne s'était élevée et se rapproche de la courbe des mélanges Esch n° II qu'elle viendrait couper un peu au delà du mélange à 50 0/0 acier. Donc, ici encore, l'influence du phosphore s'efface dans les fontes faiblement carburées, quand sa teneur est descendue en dessous de 1 0/0, tandis que l'influence du manganèse se prolonge et rend cassantes les fontes peu carburées.

Il n'en est pas ainsi dans les variations de la résistance à

la flexion. Les deux courbes *(pl. I, fig. 7)* relatives à la marche de cette résistance ont à peu près même point de départ, elles s'écartent considérablement en arrivant au mélange à 33.3 0/0 d'acier et cet écartement ne se réduit que de très peu dans la partie de ces courbes correspondant au mélange à 50 0/0 acier. L'influence déprimante du phosphore est donc très grande encore dans ce mode de résistance et elle persiste même dans les fontes à leur limite inférieure de carburation, bien que leur teneur en phosphore soit réduite à moins de 1 0/0.

Enfin, la comparaison des deux courbes *(fig. 8)*, représentant la douceur des fontes provenant de ces mélanges, met en évidence le durcissement que le phosphore communique aux fontes dans lesquelles il existe. Ainsi, en considérant comme limite d'emploi d'une fonte ayant à être ajustée, le degré de douceur n° 6 correspondant, dans notre classification, au début de la fonte demi-dure sur laquelle l'essai à la meule n'enlève que :

$$6 \times 410 \ ^{m}/_{m^3} = 2460 \ ^{m}/_{m^3} \text{ de métal,}$$

à partir de la proportion 4 0/0 d'acier dans le mélange de fonte Esch n° II, cette limite est atteinte; tandis qu'elle ne le serait dans les mélanges de fonte hématite n° III que par la proportion de 30 0/0 environ d'acier; et cependant, dans ce dernier mélange, la teneur en carbone total est de :

$$3{,}5 \times 0{,}70 + 0{,}6 \times 0{,}30 = 2{,}63 \text{ C},$$

avec $2{,}5 \times 0{,}70 = 1{,}75 \text{ M}n;$

alors que dans le mélange de fonte Esch n° II avec 4 0/0 d'acier, la teneur en carbone total est de :

$$3{,}08 \times 0{,}96 + 0{,}6 \times 0{,}04 = 2{,}98 \text{ C},$$

avec $1{,}8 \times 0{,}96 = 1{,}73 \text{ P}h.$

Donc, on doit en conclure que dans la production de moulages mécaniques avec fontes phosphoreuses analogues à la fonte Esch n° II, sur laquelle ont porté nos expériences, il n'est pas possible d'utiliser l'augmentation de ténacité résultant d'une décarburation partielle de cette fonte à l'aide

de son mélange avec du fer ou de l'acier, à cause de la dureté que détermine cette décarburation partielle, même très faible, et qui amène ces fontes à ne plus être que d'une élaboration aussi lente qu'onéreuse à l'ajustage.

Dans les mélanges d'acier avec fonte hématite manganésée, au contraire, il est possible de profiter largement et d'une façon presque complète, de l'augmentation de ténacité que l'acier permet d'obtenir avant d'atteindre la limite d'emploi imposée par l'augmentation de dureté du métal produit, et par conséquent d'améliorer dans une large proportion la résistance de ces fontes par l'addition de fer ou d'acier pendant leur fusion.

Des séries d'expériences dont nous venons de discuter les résultats, il ressort qu'en mélangeant, comme nous l'avons fait, du spiegeleisen très carburé et très manganésé à la fonte hématite n° III ou à la fonte Esch n° II, nous avons augmenté la carburation de ces fontes, ainsi que le manganèse qu'elles contenaient et nous avons en général obtenu des résistances moindres et une dureté plus grande dans les fontes produites. En mélangeant au contraire de l'acier avec ces mêmes fontes, nous avons diminué leur carburation, réduit leur teneur en manganèse et produit en général des fontes plus résistantes, mais encore plus dures.

Cependant il est possible que dans certains des mélanges avec spiegeleisen, l'altération de résistance trouvée provienne beaucoup plus de la carburation exagérée que le spiegel apporte aux mélanges dans lesquels il entre, que du manganèse en excès, qu'il introduit également. Si cela était, on devrait pouvoir obtenir des résistances égales, sinon supérieures à celles trouvées dans les mélanges avec acier, en réduisant dans les premiers mélanges la teneur en carbone des fontes hématites n° III ou Esch n° II, sans réduire dans la même proportion la teneur en manganèse; c'est-à-dire en refondant ces fontes hématite n° III ou Esch n° II, avec une fonte blanche lamelleuse de teneur égale ou peu supérieure

en carbone à celle des fontes à améliorer, et moins riche en manganèse que la fonte spiegel précédemment employée et avec de l'acier.

Par le mélange, en quantité variable, de la fonte hématite ou Esch avec de la fonte blanche lamelleuse, on n'augmentera pas sensiblement leur carburation, tandis que par l'addition d'acier à ces mélanges, on étendra leur décarburation aussi loin qu'on le voudra, tout en laissant le mélange final plus ou moins riche en manganèse, suivant que la fonte blanche employée en contenait plus ou moins, et est entrée en proportion plus ou moins grande, dans ces nouveaux mélanges ternaires.

Pour en juger, revenons à nos essais méthodiques dans lesquels, ayant fait varier progressivement les quantités relatives de fonte hématite n° III et de fonte blanche lamelleuse, d'une part, puis de fonte hématite n° III, de fonte blanche lamelleuse et d'acier, mis ensemble en fusion, d'autre part, nous avons produit les mélanges suivants :

Mélange binaire	E	80	pour cent	Fonte hématite n° III,
		20	—	Fonte blanche lamelleuse;
—	F	68	—	Fonte hématite n° III,
		32	—	Fonte blanche lamelleuse;
—	G	49,5	—	Fonte hématite n° III,
		50,5	—	Fonte blanche lamelleuse;
Mélange ternaire	H	80	—	Fonte hématite n° III,
		13,9	—	Fonte blanche lamelleuse;
		6,1	—	Acier;
—	I	67	—	Fonte hématite n° III,
		22,7	—	Fonte blanche lamelleuse;
		10,3	—	Acier ;
—	J	48,1	—	Fonte hématite n° III,
		36	—	Fonte blanche lamelleuse;
		15,9	—	Acier ;

Mélange ternaire K	80	—	Fonte hématite n° III,
	4,6	—	Fonte blanche lamelleuse ;
	15,4	—	Acier ;
— L	66,6	—	Fonte hématite n° III,
	9,25	—	Fonte blanche lamelleuse ;
	24,15	—	Acier ;
— M	49,3	—	Fonte hématite n° III,
	14,7	—	Fonte blanche lamelleuse ;
	36	—	Acier.

Éprouvés comme les précédents, ces mélanges ont fourni les résultats consignés dans le tableau suivant :

DÉSIGNATION des MÉLANGES DE FONTES	RÉSISTANCE A LA TRACTION par millimètre carré.	RÉSISTANCE AU CHOC Hauteur de chute du boulet.	RÉSISTANCE A LA FLEXION par millimètre carré.	VOLUME DE MÉTAL ENLEVÉ par usure SUR MEULE EN GRÈS	RETRAIT PAR MÈTRE COURANT	TASSEMENT SUR MASSELOTTES de 62 m/m d'épaisseur.	PROFONDEUR DE TREMPE SUR MASSELOTTES de 62 m/m d'épaisseur.	DENSITÉ
	kg	m	kg	m/m³	m/m	m/m	m/m	
Mélange E	20,8	0,42	31,1	3650	10	0	7,5	7,1
— F	22	0,475	35,8	2050	12,5	0	20	7,1
— G	11,7	0,435	36,5	1470	13,8	1,25	21	7,08
— H	26,4	0,45	36,6	3780	11,9	0	7	7,14
— I	25,8	0,54	40,5	950	10,6	3,5	35	6,92
— J	17,2	0,43	31,4	304	16,3	4	62	7,4
— K	22,7	0,49	35,1	3000	10,25	3	7,5	7,17
— L	17,4	0,50	38,2	1550	13,1	5	62	7,16
— M	21,6	0,31	33,5	500	20,6	4,5	62	7,4

Les observations suivantes ont été faites sur les barreaux d'épreuve et les masselottes coulées en coquille, avec les divers mélanges ci-dessus.

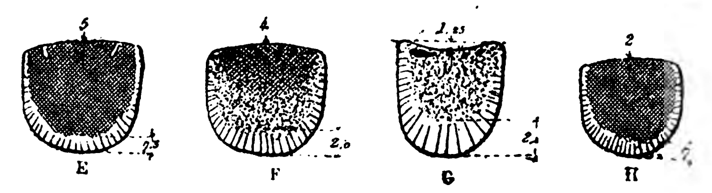
La masselotte coulée en coquille avec le mélange E était à cassure noire, à grains très fins, sauf dans la partie trempée s'étendant de 7 à 8 m/m en profondeur et qui était à texture lamelleuse.

La surface supérieure de cette masselotte était gonflée et présentait quelques piqûres.

Les barreaux d'essais à la traction et au choc ont présenté dans leur section de rupture de la fonte noire, à grains fins et brillants.

Le mélange F, coulé en coquille, a produit une fonte truitée grise, rayonnée dans la partie trempée et se fondant insensiblement dans la partie non trempée. La portion non trempée passe même au gris noir vers le centre et à la partie supérieure de la masselotte. Sa surface supérieure était gonflée et criblée de nombreuses piqûres.

Les barreaux d'essais à la traction présentaient une cassure grise, légèrement truitée de blanc; les barreaux d'essais à la



flexion et au choc étaient à cassure grise, à grains fins et brillants.

Le mélange G a produit une masselotte trempée en coquille, dont la cassure était totalement truitée dans sa partie non trempée et rayonnée dans sa partie trempée; ces deux parties se fondant insensiblement l'une dans l'autre. La surface supérieure de cette masselotte était tassée et recouvrait quelques larges et minces soufflures s'étendant sous sa croûte.

Les barrettes d'essais à la traction ont présenté une cassure de fonte blanche, truitée de gris au centre; les barreaux d'essais au choc et à la flexion étaient à cassure grise, à grains fins.

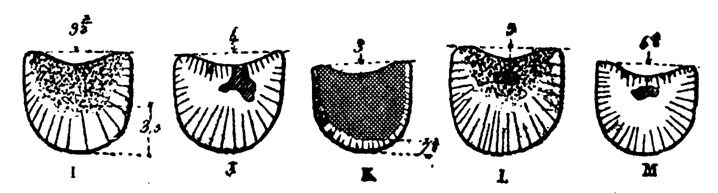
La masselotte coulée en coquille avec mélange H était en fonte noire, légèrement cristalline dans la partie trempée, les aiguilles de cristallisation se prolongeant assez loin dans le noir du restant de la cassure. La surface supérieure de cette masselotte était quelque peu gonflée.

Les barreaux d'essais étaient à cassure gris foncé, à grains très fins, légèrement truités de blanc.

La masselotte coulée en coquille avec mélange I était en fonte blanche, légèrement parsemée de points noirs, et rayonnée dans la partie trempée qui était très étendue et qui insensiblement se perdait dans la partie non trempée. La surface supérieure de cette masselotte était moyennement retassée.

Les barrettes d'essais à la traction étaient à cassure grise, truitée de blanc sur les bords; les barreaux d'essais à la flexion et au choc étaient à cassure grise, à grains fins.

La masselotte coulée en coquille avec mélange J était en fonte blanche rayonnée dans toute l'étendue de sa cassure,



avec texture très fibreuse et très arrachée dans sa partie inférieure. Sa surface supérieure très déprimée, présentait quelques piqûres et recouvrait de légères cavités de retassement formant le centre de taches de cristallisation.

Les barreaux d'essais étaient à cassure blanche, rayonnée, parsemée de points noirs, avec liséré gris sur les bords.

La masselotte coulée en coquille avec mélange K était à cassure gris foncé et cristalline dans sa partie trempée, laquelle se prolongeait quelque peu en aiguilles pour se perdre insensiblement dans le gris du restant de la cassure. Sa surface supérieure était moyennement déprimée.

Les barreaux d'essais étaient à cassure grise, un peu truitée, à grains fins, avec quelques taches de blanc et un liséré blanc sur les bords.

La masselotte coulée en coquille avec mélange L était à

cassure blanche, rayonnée sur la plus grande partie de sa section; seulement dans le haut la fonte passait au truité, c'est-à-dire était parsemée de points noirs autour d'une tache de cristallisation. La surface supérieure de cette masselotte était fortement retassée.

Les barreaux d'essais étaient à cassure grise, à grains fins avec liséré blanchâtre sur les bords.

Le mélange M a donné une masselotte trempée en coquille dont la cassure, blanche au centre, avait un tache de cristallisation vers la partie supérieure et était rayonnée, en aiguilles, à la partie inférieure. Sa surface supérieure était fortement retassée et parsemée de quelques piqûres.

Les barreaux d'essais étaient à cassure blanche, rayonnée, avec liséré gris sur les bords; quelques points gris étaient disséminés dans la section de rupture des barreaux d'essais au choc et à la flexion.

En résumé, les mélanges E et H, non trempés en coquille, ont produit de la fonte surgrise; les mélanges F et K, de la fonte grise; les mélanges I et L, de la fonte truitée; et les mélanges G, J et M, de la fonte blanche; ces derniers mélanges ne peuvent être d'aucun emploi comme fontes à travailler à l'ajustage.

Les mélanges E, H, K, coulés en coquille, donnent de bonnes fontes trempantes; tandis que les mélanges F, G, I, J, L, M prenant la trempe, soit sur la plus grande partie de leur épaisseur, soit dans leur épaisseur totale lorsqu'ils sont coulés en coquille, sont à rejeter, ne convenant pas comme fontes trempantes. De sorte que parmi ces mélanges, il ne vous reste comme fontes à la fois douces et prenant la trempe d'une façon satisfaisante, que les fontes provenant des mélanges E, H, K.

La fonte blanche lamelleuse, introduite dans ces mélanges, présentait la composition moyenne suivante :

Carbone total	3,85	0/0
Manganèse	5,1	—
Silicium.	0,3	—

La fonte hématite n° III avait encore, comme dans les mélanges précédents, la composition moyenne :

Carbone total	3,5	0/0
Silicium.	2,15	—
Manganèse	2,5	—
Phosphore.	0,36	—

Et les chutes d'acier corroyé contenaient moyennement :

Carbone	0,6	0/0

La fusion de ces mélanges ayant été faite au creuset, leur composition finale a dû être approximativement la suivante :

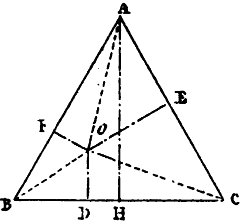
E	Carbone total	3,5 ×0,8	+3,85×0,2		=3,57 C
	Manganèse	2,5 ×0,8	+5,1 ×0,2		=3,02 Mn
	Silicium	2,15×0,8	+0,3 ×0,2		=1,78 Si
F	Carbone total	3,5 ×0,68	+3,85×0,32		=3,61 C
	Manganèse	2,5 ×0,68	+5,1 ×0,32		=3,33 Mn
	Silicium	2,15×0,68	+0,3 ×0,32		=1,556 Si
G	Carbone total	3,5 ×0,495	+3,85×0,505		=3,67 C
	Manganèse	2,5 ×0,495	+5,1 ×0,505		=3,81 Mn
	Silicium	2,15×0,495	+0,3 ×0,505		=1,21 Si
H	Carbone total	3,5 ×0,8	+3,85×0,139	+0,6×0,061	=3,37 C
	Manganèse	2,5 ×0,8	+5,1 ×0,139		=2,71 Mn
	Silicium	2,15×0,8	+0,3 ×0,139		=1,74 Si
I	Carbone total	3,5 ×0,67	+3,85×0,227	+0,6×0,103	=3,287 C
	Manganèse	2,5 ×0,67	+5,1 ×0,227		=2,84 Mn
	Silicium	2,15×0,67	+0,3 ×0,227		=1,51 Si
J	Carbone total	3,5 ×0,481	+3,85×0,36	+0,6×0,159	=3,16 C
	Manganèse	2,5 ×0,481	+5,1 ×0,36		=3,04 Mn
	Silicium	2,15×0,481	+0,3 ×0,36		=1,17 Si
K	Carbone total	3,5 ×0,8	+3,85×0,046	+0,6×0,154	=3,065 C
	Manganèse	2,5 ×0,8	+5,1 ×0,046		=2,235 Mn
	Silicium	2,15×0,8	+0,3 ×0,046		=1,734 Si

L	Carbone total	3,5 ×0,666+3,85×0,0925+0,6×0,2415	=2,84 C
	Manganèse	2,5 ×0,666+5,1 ×0,0925	=2,13 Mn
	Silicium	2,15×0,666+0,3 ×0,0925	=1,46 Si
M	Carbone total	3,5 ×0,493+3,85×0,147 +0,6×0,36	=2,5 C
	Manganèse	2,5 ×0,493+5,1 ×0,147	=1,98 Mn
	Silicium	2,15×0,493+0,3 ×0,147	=1,104 Si

Nous ne pourrons plus, comme nous l'avons fait jusqu'ici, représenter les compositions et les diverses résistances de ces mélanges binaires et ternaires, au moyen de coordonnées rectangulaires et comprenant un axe d'abscisses de longueur égale à 100m/m, dont chacun des deux segments, formés de chaque côté de l'ordonnée représentant les teneurs ou les résistances d'un mélange donné, corresponde à la proportion, en tant pour cent, des métaux fonte ou acier entrant dans ce mélange. Devant recourir pour cette représentation graphique à un autre choix de coordonnées, nous adopterons la méthode des coordonnées triangulaires, ou topographique, qui nous paraît la plus claire (1).

(1) La méthode topographique a été imaginée par M. le professeur Thurston, il y a quelques années, pour la représentation des phénomènes complexes (1 quantité dépendant de 3 variables) et particulièrement pour étudier la variation de la résistance des alliages en fonction de leur composition.

Quoique le professeur Thurston ait étudié spécialement les alliages de cuivre, zinc et étain, sa méthode peut être employée avec succès dans l'étude des mélanges de la série fonte, fer et acier, ou dans toute autre branche des sciences expérimentales.



Le principe de cette méthode de représentation repose sur la remarque géométrique suivante: Si d'un point O quelconque (fig 15) situé à l'intérieur d'un triangle équilatéral ABC, on abaisse les trois perpendiculaires OD, OE, OF sur les côtés correspondants, la somme OD + OE + OF est constante et égale à la hauteur AH du triangle ABC.

Ce triangle a, en effet, pour surface S : $S = \frac{BC}{2} \times AH.$

Joignons OA, OB, OC et nous décomposerons le triangle ABC en trois

Soit le triangle équilatéral ABC *(pl. II, fig. 1)* dans lequel les hauteurs Ax, By, Cz sont prises égales à 100$^{m}/^{m}$ et peuvent être considérées comme les ordonnées du point A, représentant 100 0/0 de fonte hématite n° III dans le mélange ; du point B, représentant 100 0/0 d'acier dans le mélange et du point C, représentant 100 0/0 de fonte blanche lamelleuse dans le mélange. Les abscisses seraient les côtés BC (opposé au sommet A), représentant tous les mélanges d'acier

---

triangles AOB, BOC et COA dont la surface totale est évidemment aussi égale à S. Or chacun de ces trois triangles a respectivement pour mesure :

$$\frac{AB}{2} \times OF = \frac{BC}{2} \times OF,$$

$$\frac{BC}{2} \times OD,$$

et

$$\frac{AC}{2} \times OE = \frac{BC}{2} \times OE ;$$

donc

$$S = \frac{BC}{2} \times AH = \frac{BC}{2} (OF + OD + OE),$$

d'où

$$OF + OD + OE = AH = \text{constante}.$$

Si l'on suppose maintenant que la hauteur AH soit divisée en 100 parties égales, chacune des lignes OF, OD, OE pourra être considérée comme représentant un tant pour cent de la hauteur AH.

Dans le cas particulier que nous avons à étudier ici, la ligne AH représentant 100 parties d'un alliage, chacune des lignes OF, OD, OE représentera respectivement les quantités des trois éléments a, b, c constitutifs d'un alliage ou mélange ternaire, quel que soit ce mélange.

Chaque point situé à l'intérieur du triangle équilatéral ABC représentera aussi, et ceci nécessairement, un mélange à trois éléments et un seul; ce mélange, ainsi défini, jouira de propriétés utiles ou non, industriellement parlant.

Fig. 16

Les sommets A, B, C du grand triangle représentent les éléments a, b, c purs ; c'est-à-dire correspondront à 100 parties de a, 100 parties de b, 100 parties de c ; de même que les côtés opposés BC, AC, AB représenteront 0 de a, 0 de b, 0 de c, soit des mélanges binaires encore très variables, tels que : $mb + nc$, $m_1a + n_1c$, $m_2a + n_2b$, etc., dont le nombre est illimité dans chaque cas spécial ; ces mélanges à deux éléments varieront naturellement avec la position du point x, x', x'' *(fig. 16)* sur l'un quelconque des côtés.

Ceci posé, considérons une série de mélanges à trois éléments repré-

et de fonte blanche lamelleuse ; AC (opposé au sommet B), représentant tous les mélanges formés de fonte hématite n° III et d'acier; AB (opposé au sommet C) représentant tous les mélanges de fonte hématite n° III et de fonte blanche lamelleuse. C'est-à-dire que ces côtés représenteraient par les longueurs d'ordonnées de leurs différents points sur les abscisses BC, AC, AB, tous les mélanges binaires formés par deux éléments, sur les trois éléments : fonte hématite n° III, fonte blanche lamelleuse et acier, dont nous pouvions disposer.

Enfin, tout point S pris à l'intérieur de ce triangle repré-

---

sentés graphiquement par les points *o*, *o'*, *o''*, etc. (*fig. 17*), et supposons qu'une étude des propriétés mécaniques ait fourni pour chacun de ces mélanges une résistance à la traction, une résistance au choc, etc., variables naturellement avec la composition chimique de ces mélanges. Elevant alors par les points *o*, *o'*, *o''*, etc., des perpendiculaires sur le plan du triangle ABC et portant sur ces perpendiculaires, à une échelle donnée, à partir de la base, des longueurs représentant, par exemple, la résistance à la rupture par traction, variable avec chaque mélange *o*, *o'*, *o''*, etc., la série des points de l'espace ainsi obtenue formera une surface topographique plus ou moins ondulée, qui sera géométriquement la représentation exacte de la loi de variation de la charge de rupture par traction, par choc, etc., d'un mélange quelconque en fonction de ses éléments.

Fig. 17

C'est ainsi que par analogie au mode de représentation connu sous le nom de méthode graphique, quand il s'agit d'un plan, on peut appliquer au mode de représentation adopté par le professeur Thurston le nom de méthode topographique.

L'emploi de cette méthode peut fournir des résultats fort intéressants dans les sciences expérimentales; on obtiendrait ainsi des reliefs topographiques qui, parlant aux yeux, se graveront beaucoup mieux dans la mémoire que des séries arides de chiffres, même mis en tableau.

Ainsi que nous l'avons dit précédemment, le professeur Thurston a appliqué en particulier cette méthode à la représentation de la résistance à la rupture par traction avec la composition des alliages de cuivre, zinc, étain et figurant par des courbes de niveau les séries d'alliages donnant une même résistance.

Pour continuer, dans cette méthode topographique, l'analogie de dénomination, l'épure formée par le triangle ABC et la situation des points *o*, *o'*, *o''*, etc., de représentation des mélanges peut être désignée sous le nom d'épure géographique de ces mélanges.

sentera le mélange ternaire dont les longueurs d'ordonnées Sx', sur l'abscisse BC, correspond à la quantité pour cent de fonte hématite nº III, Sy', sur l'abscisse AC, correspond à celle de fonte blanche lamelleuse, Sz', sur l'abscisse AB, correspond à celle d'acier, entrant dans ces mélanges à 3 éléments.

Les mélanges binaires E, F, G pourront donc être représentés par des points pris sur l'abscisse AB, les mélanges ternaires H, I, J, K, L, M, pourront l'être par des points situés à l'intérieur du triangle ; et, remarquons que les mélanges binaires N, O, P, Q déjà étudiés, pourront également être représentés, sur le triangle ABC, par des points pris sur l'abscisse AC, puisque la même fonte hématite nº III et de l'acier de même nature sont entrés dans tous ces mélanges H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q.

Les mélanges E, F, G seront représentés *(fig. 1, pl. II)* par les points de même nom E, F, G, pris sur AB et ayant pour ordonnées :

(E)	$Ex_1 = 80^{m}/^{m}$	$Ey_1 = 20^{m}/^{m}$
(F)	$Fx_1 = 68^{m}/^{m}$	$Fy_1 = 32^{m}/^{m}$
(G)	$Gx_1 = 49^{m}/^{m}5$	$Gy_1 = 50^{m}/^{m}5$

Les mélanges H, I, J, K, L, M seront représentés par les points de même désignation H, I, J, K, L, M, pris à l'intérieur du triangle et ayant pour ordonnées :

(H)	$Hx_1 = 80^{m}/^{m}$	$Hy_1 = 13^{m}/^{m}9$	$Hz_1 = 6^{m}/^{m}1$
(I)	$Ix_1 = 67^{m}/^{m}$	$Iy_1 = 22^{m}/^{m}7$	$Iz_1 = 10^{m}/^{m}3$
(J)	$Jx_1 = 48^{m}/^{m}1$	$Jy_1 = 36^{m}/^{m}$	$Jz_1 = 15^{m}/^{m}9$
(K)	$Kx_1 = 80^{m}/^{m}$	$Ky_1 = 4^{m}/^{m}6$	$Kz_1 = 15^{m}/^{m}4$
(L)	$Lx_1 = 66^{m}/^{m}6$	$Ly_1 = 9^{m}/^{m}25$	$Lz_1 = 24^{m}/^{m}15$
(M)	$Mx_1 = 49^{m}/^{m}3$	$My_1 = 14^{m}/^{m}7$	$Mz_1 = 36^{m}/^{m}$

Enfin, les mélanges binaires N, O, P, Q, précédemment étudiés, seront aussi, dans ce triangle, représentés sur l'abscisse

AC par les points de même désignation N, O, P, Q tels que leurs ordonnées

(N)	$Nx_1 = 90^{m}/^{m}$	$Nz_1 = 10^{m}/^{m}$
(O)	$Ox_1 = 80^{m}/^{m}$	$Oz_1 = 20^{m}/^{m}$
(P)	$Px_1 = 66^{m}/^{m}6$	$Pz_1 = 33^{m}/^{m}3$
(Q)	$Qx_1 = 50^{m}/^{m}$	$Qz_1 = 50^{m}/^{m}$

Si maintenant, nous considérons les points A, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P et Q ainsi déterminés, par leur situation géographique, pour ainsi dire, sur la surface du triangle ABC, comme traces d'ordonnées ayant pour hauteurs des longueurs proportionnelles aux teneurs en carbone, manganèse et silicium des mélanges que ces points représentent, les surfaces plus ou moins ondulées, passant par l'extrémité de ces ordonnées élevées dans l'espace, pourront représenter approximativement par les longueurs d'ordonnées abaissées de ces surfaces, sur le plan ABC, les teneurs en carbone, manganèse et silicium, de tous les mélanges ternaires compris entre les mélanges essayés.

Ces surfaces ondulées de représentation des teneurs seront à leur tour représentées graphiquement par des courbes de niveau distantes les unes des autres d'une fraction de longueur d'ordonnées correspondant à chaque 1/2 pour cent, par exemple, de chacune des teneurs.

Ainsi, pour déterminer les lignes de niveau de la surface représentative de la teneur en carbone, faisons passer *(pl. II, fig. 2)* par les points AEFG, AHIJ, AKLM, ANOPQ des surfaces verticales qui, par leur rencontre dans l'espace avec cette surface de représentation de la teneur en carbone, nous donneront autant de lignes d'intersection que de surfaces verticales employées.

Le plan vertical passant par AEFG aura pour intersection, avec la surface topographique des teneurs en carbone, une certaine ligne $A_1E_1F_1G_1$ telle que ses ordonnées :

AA_1 soit égale à $35^m/^m$ représentant 3,5 0/0 de teneur en carbone de la fonte A,

EE_1 soit égale à 35,7 représentant 3,57 0/0 de teneur en carbone du mélange E,

FF_1 soit égale à 36,1 représentant 3,61 0/0 de teneur en carbone du mélange F,

GG_1 soit égale à 36,7 représentant 3,67 0/0 de teneur en carbone du mélange G.

Il suffit de supposer ce plan vertical A_1AGG_1 rabattu dans le plan du triangle ABC, autour de sa trace AEFG, de faire passer une ligne joignant les extrémités A_1, E_1, F_1, G_1 des ordonnées AA_1, EE_1, FF_1, GG_1, pour que cette ligne $A_1E_1F_1G_1$ représente l'intersection de la surface topographique des teneurs en carbone, avec le plan vertical ayant pour trace la ligne droite AEFG.

En considérant comme plane la surface verticale ayant pour trace la ligne AHIJ, faisant tourner cette surface autour de l'ordonnée du point A, dans l'espace, jusqu'à ce que cette surface verticale se confonde avec le plan vertical AA_1G_1G, et le rabattant ensuite autour de la ligne AG, dans le plan du triangle ABC, il suffira de porter sur les ordonnées des points H, I, J, après leur rotation, des longueurs :

$HH_1 = 33^m/^m7$ représentant 3,37 0/0 de teneur en carbone du mélange H,

$I'I_1 = 32{,}87$ représentant 3,287 0/0 de teneur en carbone du mélange I,

$J'J_1 = 31{,}6$ représentant 3,16 0/0 de teneur en carbone du mélange J,

de joindre par une ligne continue les points A_1, H_1, I_1, J_1 limitant les ordonnées AA_1, $H'H_1$, $I'I_1$, $J'J_1$, pour obtenir la ligne d'intersection de la surface verticale ayant pour trace AHIJ avec la surface topographique de la teneur en carbone des mélanges.

On opérerait de même, en faisant tourner la surface verti-

cale de trace AKLM autour de l'ordonnée A, dans l'espace, jusqu'à ce qu'elle se confonde avec le plan vertical de trace AQ, puis rabattant cette surface verticale autour de AQ, dans le plan du triangle ABC, portant les longueurs :

$K'K_1$ = 30m/m65 représentant 3,065 0/0 de teneur en carbone dans le mélange K,

$L'L_1$ = 28m/m4 représentant 2,84 0/0 de teneur en carbone dans le mélange L,

$M'M_1$ = 25m/m représentant 2,5 0/0 de teneur en carbone dans le mélange M.

Ensuite faisant passer par les points A_1, K_1, L_1, M_1 extrémité des ordonnées rabattues, la ligne $A_1K_1L_1M_1$, on obtiendrait l'intersection de la surface verticale, de trace AKLM, avec la surface topographique de représentation de la teneur en carbone des mélanges.

Enfin, cette même construction permettrait de trouver la ligne $A_1N_1O_1P_1Q_1$ d'intersection du plan vertical de trace AQ, avec la surface de représentation de la teneur en carbone des mélanges.

Nous avons obtenu ainsi quatre lignes A_1G_1, A_1J_1, A_1M_1, A_1Q_1 de la surface topographique qui, dans l'espace, représente les teneurs en carbone des mélanges compris entre les lignes AG, AQ et GJMQ; nous pourrons de même obtenir encore d'autres lignes de cette même surface, en déterminant ses lignes d'intersection avec les surfaces verticales ayant pour traces les lignes EHKO, FILP, GJMQ. Nous connaissons les ordonnées de l'espace EE_1, HH_1, KK_1, OO_1 qu'il suffit de reporter sur un plan vertical parallèle, en $E'E_1$, $H'H_1$, K'K, O'O, et de rabattre dans le plan du triangle ABC, la ligne $E_1H_1K_1O_1$ donnera l'intersection du plan vertical de trace EHKO avec la surface topographique de représentation des teneurs en carbone.

Nous trouverons de même la ligne $F_1I_1L_1P_1$ d'intersection de la surface verticale de trace FILP avec la surface de représen-

tation des teneurs en carbone, et la ligne $G_1J_1M_1Q_1$ d'intersection de la surface verticale de trace GJMQ avec la surface de représentation des teneurs en carbone; ce qui, avec les 4 lignes d'intersection précédemment trouvées, nous donne 7 lignes de la surface topographique qui, dans l'espace, représente les teneurs en carbone des mélanges de fonte compris entre la fonte A et les mélanges G, J, M, Q.

Les plans horizontaux que nous ferons passer à 20 m/m, 25 m/m, 30 m/m, 35 m/m et 40 m/m du plan du triangle ABC, correspondront à des teneurs en carbone de 2 0/0, 2 1/2 0/0, 3 0/0, 3 1/2 0/0 et 4 0/0 et auront pour traces sur les sections verticales rabattues dans le plan du triangle ABC les horizontales 2, 2,5, 3, 3,5, et 4 qui viendront couper en divers points les sept lignes $A_1E_1F_1G_1$, $A_1H_1I_1J_1$, $A_1K_1L_1M_1$, $A_1N_1O_1P_1Q_1$, $E_1H_1K_1O_1$, $F_1I_1L_1P_1$, $G_1J_1T_1Q_1$. Ces points d'intersection correspondront à autant de points de la surface topographique des teneurs en carbone situés sur les lignes d'intersection des plans horizontaux figurant les teneurs 2, 2 1/2, 3, 3 1/2 et 4 0/0 de carbone, avec cette surface de représentation, et correspondront par conséquent à des points des lignes de niveau cherchées.

En prenant le premier plan horizontal, celui de 2 1/2 0/0, qui rencontre quelques-unes des 7 lignes de la surface topographique, et ramenant ces points de rencontre de leur position rabattue à leur situation dans l'espace, on obtiendra par leur projection sur le plan ABC des points de projection de la ligne de niveau 2 1/2 0/0 C, et la projection de cette ligne de niveau se tracera en joignant les points ainsi déterminés. Puis, passant aux points d'intersection du plan horizontal 3 0/0 C avec celles des 7 lignes de la surface topographique des teneurs en carbone que ce plan rencontre, ramenant ces points de leur position rabattue à leur position dans l'espace, on obtiendra encore par leur projection sur le plan ABC, des points de projection de la ligne de niveau 3 0/0 C

et la projection de cette ligne de niveau se tracera encore en joignant par une ligne continue les points de projection ainsi déterminés. De même on trouverait non seulement la projection de la ligne de niveau correspondant à 3 1/2 0/0 C, mais encore celle des lignes de niveau correspondant à 1 1/2 0/0, 2 0/0, 2 1/2 0/0, 3 0/0 de teneur en manganèse, et celle des lignes de niveau correspondant aux teneurs en silicium 1 1/2 et 2 0/0.

L'aspect des projections des lignes de niveau tracées dans l'épure *(pl. II, fig. 2)* montre que les surfaces topographiques de représentation du carbone, du manganèse et du silicium sont à peu près planes; que les mélanges représentés géographiquement dans le voisinage du côté AB, du triangle ABC, sont ceux qui renferment le plus de carbone; que la teneur en carbone se réduit progressivement à mesure que les mélanges s'éloignent du côté AB, pour se rapprocher du point Q correspondant au minimum de teneur en carbone; que ce point Q correspond aussi aux mélanges à teneur la plus faible en manganèse, et de plus que cette teneur s'élève progressivement à mesure que les mélanges approchent du point G correspondant au mélange ayant la teneur en manganèse la plus élevée; enfin, que le point A correspond à la fonte contenant le plus de silicium et que la teneur en silicium se perd progressivement à mesure que les mélanges s'éloignent du point A pour se rapprocher de la ligne GJMQ, correspondant à des mélanges à peu près d'égale teneur en silicium, mais dans lesquels cependant le minimum correspond au mélange Q.

En partant de l'épure géographique *(pl. II, fig. 1)* des mélanges essayés et élevant sur les points connus de cette épure, reportée *(pl. III, fig. 1)*, des ordonnées de longueur proportionnelle aux efforts de traction qui ont déterminé la rupture des barrettes d'essais coulées avec les mélanges éprouvés, en faisant passer une surface par l'extrémité de ces ordonnées, nous obtiendrons la loi de variation des résistances à la

traction des mélanges de fonte hématite n° III, de fonte blanche lamelleuse et d'acier. Nous représenterons cette surface topographique par la projection, sur le plan du triangle ABC, de ses courbes de niveau correspondant aux efforts de rupture 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25 et 27^{kg} par millimètre carré, déterminées comme nous l'avons fait précédemment, dans l'épure *(pl. II, fig. 2)*, pour les courbes de niveau relatives aux teneurs en carbone de ces mêmes mélanges.

Ici, cette surface topographique, ou loi de variation des résistances à la traction, loin d'être plane, présente un sommet assez prononcé entre les points H et I et correspondant à un maximum d'environ 27^{kg} par millimètre carré d'effort de rupture par traction donné par ces mélanges de fonte et d'acier; tandis que dans les mélanges de fonte hématite n° III et d'acier, nous n'avions trouvé pour maximum de résistance à la traction qu'un peu moins de 25^{kg} par millimètre carré *(pl. I, fig. 1)*.

Par sa situation géographique, ce sommet 27^{kg} correspond à peu près à un mélange formé de :

7,2 0/0 acier,
15,9 0/0 fonte blanche lamelleuse,
77 0/0 fonte hématite n° III ;

et sa composition approximative est de

Carbone tot.	$3{,}5 \times 0{,}77 + 3{,}85 \times 0{,}158 + 0{,}6 \times 0{,}072$	$= 3{,}35$ 0/0 C
Manganèse.	$2{,}5 \times 0{,}77 + 5{,}1 \times 0{,}158$	$= 2{,}73$ 0/0 Mn
Silicium	$2{,}15 \times 0{,}77 + 0{,}3 \times 0{,}158$	$= 1.7$ 0/0 Si

Remarquons que si, dans la loi de variation *(pl. III, fig. 1)*, le relief 27^{kg} forme à peu près un sommet, la région correspondant à une résistance supérieure à 25^{kg} est assez étendue pour qu'il soit facile de produire des mélanges donnant 25^{kg} et plus de résistance à la traction, même en admettant que dans l'appareil de fusion le métal choisi pour les mélanges

se dénature quelque peu, ou que les fontes employées ne se maintiennent pas rigoureusement à une composition identique.

L'épure géographique *pl. II, fig. 1* reportée *pl. III, fig. 2* va nous servir également à construire la loi de variation des résistances au choc présentées par le mélange en proportions variées de fonte hématite n° III, de fonte blanche lamelleuse et d'acier.

Pour déterminer la surface représentant cette loi de variation, élevons dans l'espace, sur chacun des 14 points correspondant aux mélanges éprouvés, des ordonnées de longueur proportionnelle aux résistances au choc trouvées dans les essais, et imaginons une surface ondulée passant par l'extrémité de ces 14 ordonnées ; cette surface sera la loi cherchée. Nous la représenterons par les projections, sur le plan du triangle ABC, de ses courbes de niveau correspondant aux hauteurs de chute du boulet sous lesquelles s'est produite la rupture des barreaux soumis à l'essai :

0^m35 0^m40 0^m45 0^m50 et 0^m55;

et après avoir déterminé les points de ces courbes de niveau, nous les tracerons au moyen des mêmes constructions graphiques que précédemment.

Dans cette surface topographique très ondulée *(pl. III, fig. 2)* réprésentant les variations de résistance au choc, nous trouvons aussi qu'un sommet existe dans le voisinage du point I et qu'un autre sommet un peu plus élevé se trouve dans le voisinage du point P. Ces deux sommets correspondent aux maxima: 0^m54 de résistance au choc pour le premier, et 0^m55 de résistance au choc pour le second ; pour ce dernier, la résistance au choc est la même que celle des mélanges de fonte hématite n° III et d'acier *(pl. I, fig. 6)*.

Le sommet situé dans le voisinage du point I correspond à peu près au mélange I, c'est-à-dire à :

67 0/0 fonte hématite n° III,
22,7 0/0 fonte blanche lamelleuse,
10,3 0/0 acier;

et à une composition de : 3,287 0/0 carbone,
2,84 0/0 manganèse,
1,51 0/0 silicium.

Remarquons encore que si, dans cette loi de variation des résistances au choc, les reliefs correspondant à 0^m54 et 0^m55 sont très limités, les deux zones de résistance au choc supérieure à 0^m50 sont au contraire très étendues, surtout celle qui comprend le sommet I; et que même en admettant quelque variation dans les proportions, ou quelque altération dans la composition des fontes du mélange devant procurer le maximum de résistance au choc, facilement on devra pouvoir arriver à une fonte résistant à une hauteur de chute du boulet comprise entre 0^m50 et 0^m55.

Appliquons encore la même épure géographique *pl. II, fig. 1* reportée *pl. III, fig. 3,* à l'établissement de la loi de variation des résistances à la flexion, par millimètre carré, présentée par les mélanges en diverses proportions de fonte hématite n° III, de fonte blanche lamelleuse et d'acier. Déterminons la surface topographique représentant cette loi, en fonction des éléments entrant dans ces mélanges, en élevant sur chacun des 14 points de l'épure géographique correspondant à des mélanges essayés, des ordonnées de longueur proportionnelle aux résistances à la flexion trouvées dans les épreuves.

La surface passant par l'extrémité de ces 14 ordonnées sera la loi de variation cherchée.

Nous la représenterons aussi par les projections, sur le plan du triangle ABC, de ses courbes de niveau correspondant aux résistances : 20, 25, 30, 35 et 40^{kg}; et après avoir déterminé les points de ces courbes de niveau, nous tracerons les horizontales de la surface topographique en réunissant par une ligne continue les points appartenant aux mêmes plans.

Remarquons que les surfaces correspondant à 40^{kg} et contenant les maxima de résistance à la flexion sont assez larges, que la zone des résistances à la flexion supérieures à 35^{kg} est

très étendue. Donc ici encore, même en admettant une altération assez sensible dans les proportions ou la composition des fontes du mélange devant produire le maximum de résistance à la flexion, on devra facilement arriver à obtenir une fonte possédant à la flexion une résistance comprise entre 35 et 40^{kg} par millimètre carré, puisque ces résistances correspondent à une variation assez large des éléments du mélange.

L'épure *pl. IV, fig. 1*, donnant par les courbes de niveau tracées dans le plan du triangle ABC les horizontales de la loi de variation du degré de douceur des mélanges de fontes, formés par des proportions diverses de fonte hématite n° III, de fonte blanche lamelleuse et d'acier, a été obtenue, comme les précédentes lois de résistances relatives à ces mêmes mélanges, en faisant passer une surface par l'extrémité de chacune des 14 ordonnées prises de longueur proportionnelle aux volumes de métal enlevé dans l'essai à l'usé sur la meule de ces 14 mélanges, et, déterminant par construction graphique les courbes de niveau de cette surface.

Seulement ici, nous avons choisi nos courbes de niveau correspondant aux degrés de l'échelle de douceur que nous avons proposée; c'est-à-dire que nous avons pris le plan de niveau supérieur 10 correspondant aux 4100 $^{m}/^{m^3}$ d'usure de la fonte Coltness n° I et avons divisé en 10 parties la distance verticale qui le sépare du plan ABC du triangle; puis nous avons fait passer un plan de niveau à la division,

9	correspondant à	$9 \times 410^{m}/^{m^3}$	$= 3690^{m}/^{m^3}$	d'usure	sur la meule,
8	—	8×410	$= 3280$	—	—
7	—	7×410	$= 2870$	—	—
6	—	6×410	$= 2460$	—	—

et ainsi de suite, jusqu'à la division 1 correspondant à 410$^{m}/^{m^3}$.

De cette façon, l'intersection du plan de niveau 8, avec la surface représentant l'usure de ces mélanges, délimitera la séparation des fontes douces avec les fontes demi-douces, et

l'intersection du plan de niveau 6, avec cette même surface, formera la séparation des fontes demi-douces avec les fontes demi-dures, qui ne sont d'aucun emploi pratique comme fontes à ajuster, à cause de leur dureté et des difficultés que cette dureté entraînerait dans leur travail.

Ainsi la courbe de niveau 6 formant la limite d'emploi de ces mélanges, comme fontes mécaniques, viendrait passer entre les points E et F, H et I, K et L, O et P et nous forcerait à rejeter les mélanges I et P donnant le maximum de résistance à la flexion et au choc. Seul le maximum de résistance à la traction qui vient tomber entre H et I, pourrait être atteint; de sorte qu'en employant le mélange qui procure le maximum 27^{kg} de résistance à la traction, nous obtiendrons une fonte donnant environ $0^{m}45$ à $0^{m}50$ de résistance au choc et 40^{kg}, par millimètre carré, de résistance à la flexion. Ce sont là encore de fort belles résistances si on les compare à celles de la fonte hématite n° III pure : résistance à la traction $17^{kg}1$ par millimètre carré, résistance au choc $0^{m}37$, résistance à la flexion $19^{kg}69$ par millimètre carré; et même comparées à celles de la fonte Hartguss de Grüson : résistance à la traction $22^{kg}7$, résistance au choc $0^{m}46$, résistance à la flexion $33^{kg}39$.

Un mélange compris entre H et I, mais plus voisin de H, serait donc celui qui, tout en présentant un degré de douceur assez élevé pour n'être pas rejeté dans son emploi comme fonte mécanique, réunirait la plus grande somme de ténacité que peuvent offrir ces divers mélanges de fontes et d'acier.

L'ensemble des courbes de niveau de cette épure *pl. IV, fig. 1*, présente ce fait assez curieux : que ces courbes superposées aux courbes de niveau de la loi de résistance à la traction *(pl. III, fig. 1)* sont la plupart presque normales entre elles; c'est-à-dire que les unes sont presque les lignes de plus grande pente de la surface sur laquelle sont situées les autres; ce qui, tout en montrant une certaine corrélation entre ces

courbes de niveau prouve que le même degré de douceur peut se rencontrer dans une fonte, quelle que soit la variation de sa ténacité, et réciproquement que le même degré de ténacité peut se rencontrer dans une fonte, quel que soit son degré de douceur ou de dureté.

Cette disposition normale des courbes de niveau de la loi de l'usure, dans les mélanges de fontes considérés, se retrouve encore, mais beaucoup plus vaguement, dans les épures *(pl. III, fig. 2 et 3)* relatives aux lois de résistance de ces mélanges au choc et à la flexion.

L'épure *(pl. IV, fig. 2)* de la loi de variation du retrait dans ces mélanges de fontes et d'acier a été construite en partant de l'épure géographique *(pl. II, fig. 1)* et en élevant en chacun des 14 points qui, dans cette épure, représentent les mélanges essayés, des ordonnées de longueur proportionnelle aux retraits mesurés sur les barreaux de 40/40 m/m et de 0m50 de longueur, ayant servi aux épreuves au choc et à la flexion, et imaginant une surface passant par l'extrémité de ces 14 ordonnées élevées dans l'espace.

Les courbes de niveau de cette surface ont été tracées d'après leurs points obtenus au moyen de la même méthode de construction graphique que les précédentes et, par des plans de niveau correspondant aux retraits 10, 12.5, 15, 17.5 et 20m/m par mètre.

Par cette épure, nous voyons que, de toutes ces fontes, celle qui donne le minimum de retrait est le mélange E et ses voisins, tandis que la fonte donnant le maximum de retrait est comprise entre les mélanges M et Q; et encore que la zone des retraits linéaires inférieurs à 12m/m5 s'étend sur une très large étendue, et comprend les mélanges H et I entre lesquels nous avons trouvé la fonte présentant le maximum de ténacité.

Cette épure nous permet de remarquer encore que l'acier introduit dans ces mélanges, en les décarburant partiellement, augmente beaucoup plus les retraits que ne le fait la fonte blanche lamelleuse par le manganèse qu'elle apporte.

La loi de variation du tassement de la fonte, dans ces mélanges, est figurée par l'épure *(pl. IV, fig. 3)* donnant, sur le plan ABC du triangle, la projection des courbes de niveau correspondant aux affaissements du milieu de la surface supérieure des masselottes coulées en coquille. Comme toutes les autres, la surface de représentation de cette loi de tassement a été imaginée passant par l'extrémité des ordonnées prises de longueur proportionnelle au tassement mesuré sur les masselottes des mélanges correspondant à ces ordonnées, et les courbes de niveau ont été déterminées par l'intersection de cette surface topographique de représentation, avec les plans horizontaux correspondant à 1, 2, 3, 4, 5 m/m de tassement.

Cette épure montre que le tassement est inférieur à 1 m/m, sur une épaisseur de 62 m/m, dans les mélanges voisins de H, comprenant la fonte qui présente le maximum de ténacité, et que le tassement s'élève déjà de 3 à 4 m/m dans le mélange I et les mélanges voisins.

Cette fonte I donnant au choc ou à la flexion les résistances maxima, serait donc une fonte très tassante et de mauvais emploi dans les pièces massives.

Observons encore sur cette épure que le tassement, que l'acier introduit dans ces mélanges leur fait éprouver, est beaucoup plus grand que celui auquel donne lieu la fonte blanche lamelleuse.

Notons enfin que la profondeur de tassement, telle que nous l'avons mesurée, ne donne pas le tassement total, puisque nous n'avons pu tenir compte des cavités intérieures formées par le retrait de la fonte à l'état liquide et existant dans quelques-unes des masselottes de ces mélanges.

L'épure relative à la loi de variation de la profondeur de trempe prise par ces mélanges variés, dans leur coulée en coquille, est établie en reportant *(pl. IV, fig. 4)* l'épure géographique *(pl. II, fig. 1)* et élevant, en chacun des 14 points connus de cette épure, des ordonnées de longueur proportion-

nelle à la profondeur de trempe trouvée en cassant les masselottes.

La surface passant par l'extrémité de chacune de ces ordonnées donnera la loi de variation des profondeurs de trempe et sera représentée par les projections, sur le plan du triangle ABC, de ses courbes de niveau correspondant à 5, 10, 15, 30, 45 et 62 $^m/_m$ de profondeur de trempe.

Sur cette épure, nous trouvons que la trempe augmente progressivement à mesure que les teneurs en carbone et en silicium s'abaissent dans les mélanges; tandis qu'à l'inverse, l'augmentation de teneur en manganèse correspond à une élévation de la trempe, peu sensible, il est vrai, mais qui le serait beaucoup plus si, dans ces mélanges, l'augmentation de la teneur en manganèse n'avait pour conséquence (à cause de la fonte lamelleuse employée) une augmentation de la teneur en carbone produisant sur la profondeur de trempe des effets qui se combattent.

Si l'on observe que, dans nos essais, les masselottes coulées en coquille pesaient 5 ^{kg} et que la coquille pesait 15 ^{kg}; c'est-à-dire que cette dernière était trois fois plus lourde que les masselottes (rapport de poids le plus convenable dans la coulée de la fonte en coquille) en adoptant le même rapport de poids en pratique, on trouvera que le mélange H et ses voisins, se trempant sur environ 7 $^m/_m$ de profondeur pour 62 $^m/_m$ d'épaisseur, soit environ 1/9 de leur épaisseur, prennent une trempe largement suffisante dans la généralité des cas. Ces mélanges tenaces conviennent donc aussi bien pour la partie trempée des pièces que pour leur partie non trempée.

A partir de la profondeur de trempe 10 $^m/_m$, l'épaisseur trempée augmente très rapidement; dans le mélange I la trempe se produit déjà sur 20$^m/_m$, soit 1/3 de l'épaisseur, et devient beaucoup trop élevée pour ne pas nuire trop considérablement à la résistance des pièces; au delà, dans les mélanges J, L, P, la trempe se produisant dans toute l'épaisseur

transforme ces mélanges, déjà plus ou moins blancs, en fonte totalement blanche.

Pour terminer la comparaison parallèle que nous avons établie précédemment dans nos essais entre la fonte hématite n° III manganèse et la fonte phosphoreuse Esch n° II, employées comme fontes principales dans nos divers mélanges, voyons, pour les étudier, les résultats fournis par les mélanges suivants :

Mélange E′	79	0/0	Fonte Esch n° II,
	21	—	Fonte blanche lamelleuse;
— F′	67	—	Fonte Esch n° II,
	33	—	Fonte blanche lamelleuse;
— G′	50	—	Fonte Esch n° II,
	50	—	Fonte blanche lamelleuse;
— H′	80	—	Fonte Esch n° II,
	6,15	—	Fonte blanche lamelleuse,
	13,85	—	Acier;
— I′	66,6	—	Fonte Esch n° II,
	10,2	—	Fonte blanche lamelleuse,
	23,2	—	Acier;
— J′	50	—	Fonte Esch n° II,
	14,9	—	Fonte blanche lamelleuse,
	35,1	—	Acier;
— K′	79	—	Fonte Esch n° II,
	12,5	—	Fonte blanche lamelleuse,
	8,5	—	Acier;
— L′	67	—	Fonte Esch n° II,
	19,7	—	Fonte blanche lamelleuse,
	13,3	—	Acier;
— M′	50	—	Fonte Esch n° II,
	30,2	—	Fonte blanche lamelleuse,
	19,8	—	Acier.

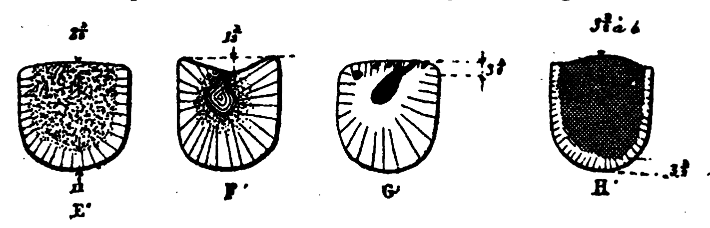
Dans les différents essais auxquels ils furent soumis, ces

mélanges ont fourni les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous :

DÉSIGNATION des MÉLANGES DE FONTES	RÉSISTANCE A LA TRACTION par millimètre carré.	RÉSISTANCE AU CHOC Hauteur de chute du boulet.	RÉSISTANCE A LA FLEXION par millimètre carré.	VOLUME DE MÉTAL ENLEVÉ SUR MEULE EN GRÈS par usure.	RETRAIT PAR MÈTRE COURANT	TASSEMENT SUR MASSELOTTES de 62 m/m d'épaisseur.	TREMPE SUR MASSELOTTES de 62 m/m d'épaisseur.	DENSITÉ
	kg	m	kg	m/m³	m/m	m/m	m/m	
Mélange E′	11,5	0,29	24,7	2140	10,9	0	11	7
— F′	8,3	0,375	27,5	1200	12,1	1,5	62	6,94
— G′	5,8	0,225	20,6	473	13,6	0	62	7,32
— H′	20,8	0,25	29,5	2000	11,1	0	3,5	6,98
— I′	13,8	0,335	32,2	1410	13,4	7,5	62	7,03
— J′	9	0,28	20,1	326	17,2	0	62	7,27
— K′	18,2	0,385	295	1200	12,3	0	62	6,97
— L′	15	0,375	28	1640	11,1	2,8	62	7,14
— M′	13,9	0,325	27,5	675	17,8	3,7	62	7,37

Les cassures des barreaux d'essais et celles des masselottes coulées en coquille avec ces divers mélanges ont donné lieu aux observations suivantes :

Mélange E′. — Masselotte coulée en coquille, cassure truitée, grise sur fonc blanc, blanc rayonné lamelleux dans la partie trempée assez profonde et qui se perd dans le fond truité. Surface supérieure de la masselotte légèrement gonflée.



Barrettes d'essais à la traction, à cassure blanche, lamelleuse, remplie de points gris.

Barreaux d'essais au choc et à la flexion à cassure grise, à grains fins.

Mélange F'. — Masselotte coulée en coquille, cassure de fonte blanche fibreuse, avec grosse cavité de tassement en haut, vers le milieu, et quelques points noirs répandus autour de cette cavite ; surface supérieure faiblement retassée et en communication avec la cavité.

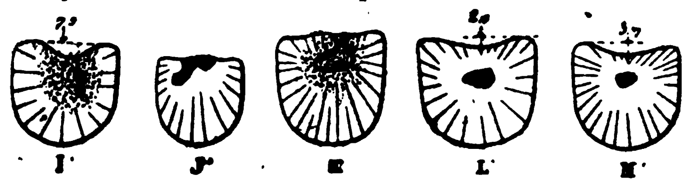
Barrettes d'essais à la traction, à cassure rayonnée, lamelleuse, avec quelques points gris disséminés.

Barreaux d'essais au choc et à la flexion à cassure gris-clair contenant quelques petites taches blanches.

Mélange G'. — Masselotte coulée en coquille, à cassure blanche, rayonnée, avec caverne de tassement assez profonde; surface supérieure légèrement gonflée et remplie de piqûres à peine visibles, mais s'étendant profondément en dessous.

Barreaux d'essais, à cassure blanche lamelleuse.

Mélange H'. — Masselotte coulée en coquille, à cassure truitée, grise sur fond blanc ; le truité excessivement fin donne à la cassure l'aspect gris-clair ; faible trempe passant brusquement au truité, surface supérieure sensiblement gonflée.



Barreaux d'essais, à cassure grise, à grains fins, très légèrement truitée.

Mélange I'. — Masselotte coulée en coquille, à cassure blanche, fibreuse, rayonnée, avec quelques points noirs disséminés à la partie supérieure de cette cassure et autour d'une cavité de tassement à parois cristallines ; surface supérieure lisse, mais très fortement retassée et en communication avec la cavité.

Barrettes d'essai à la traction, à cassure blanche, rayonnée, avec quelques points noirs disséminés dans cette cassure.

Barreaux d'essais au choc et à la flexion, à cassure gris très clair, avec quelques taches blanches.

Mélange J'. — Masselotte coulée en coquille, à cassure blanche, rayonnée, à surface supérieure plate ; mais remplie de piqûres en communication avec de fortes cavités de tassement, à parois tapissées de cristallisations.

Barreaux d'essais à cassure blanche, rayonnée et contenant quelques points gris.

Mélange K'. — Masselotte coulée en coquille, à cassure blanche, rayonnée et grenue, avec cavité de retassement remplie de cristallisations et quelques points noirs autour. Surface supérieure sans tassement.

Barrettes d'essais à la traction, à cassure blanche, truitée de points gris.

Barreaux d'essais au choc et à la flexion, à cassure gris-clair, à grains fins et arrachés.

Mélange L'. — Masselotte coulée en coquille, à cassure blanche, rayonnée, avec tache assez large de cristallisation dans le milieu vers le haut, et quelques points noirs disséminés dans la cassure; surface supérieure légèrement retassée.

Barrettes d'essais à la traction, à cassure blanche rayonnée, parsemée de quelques points gris.

Barreaux d'essais au choc et à la flexion, à cassure gris-clair, et taches blanches assez larges.

Mélange M'. — Masselotte coulée en coquille, à cassure blanche, rayonnée, avec petite tache de cristallisation dans le milieu, vers le haut, surface supérieure moyennement retassée.

Barreaux d'essais à cassure blanche, rayonnée, un peu lamelleuse, avec quelques points gris et liseré gris sur les bords, dans les barreaux de 40/40 m/m de section.

En résumé, seuls les mélanges E' et H', non trempés en coquille, ont produit de la fonte grise ou à peu près; et par la trempe en coquille, ils sont devenus truités. Tous les autres mélanges ont produit de la fonte blanche, quoique



non coulés en coquille ; et par la trempe en coquille, la plupart ont passé entièrement à l'état de fonte blanche, tassante, caverneuse et impropre à toute fabrication de pièces moulées.

Ces mélanges après leur fusion en creusets devaient, approximativement, posséder la composition suivante :

E'	Carbone total	$3{,}08 \times 0{,}79$	$+3{,}85 \times 0{,}21$		$= 3{,}24$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}79$	$+5{,}1 \times 0{,}21$		$= 1{,}37$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}79$	$+0{,}3 \times 0{,}21$		$= 1{,}803$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}79$			$= 1{,}42$ Ph
F'	Carbone total	$3{,}08 \times 0{,}67$	$+3{,}85 \times 0{,}33$		$= 3{,}33$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}67$	$+5{,}1 \times 0{,}33$		$= 1{,}935$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}67$	$+0{,}3 \times 0{,}33$		$= 1{,}57$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}67$			$= 1{,}20$ Ph
G'	Carbone total	$3{,}08 \times 0{,}5$	$+3{,}85 \times 0{,}5$		$= 3{,}46$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}5$	$+5{,}1 \times 0{,}5$		$= 2{,}74$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}5$	$+0{,}3 \times 0{,}5$		$= 1{,}25$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}5$			$= 0{,}9$ Ph
H'	Carbone total	$3{,}08 \times 0{,}8$	$+3{,}85 \times 0{,}0615$	$+0{,}6 \times 0{,}1385$	$= 2{,}78$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}8$	$+5{,}1 \times 0{,}0615$		$= 0{,}618$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}8$	$+0{,}3 \times 0{,}0615$		$= 1{,}778$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}8$			$= 1{,}42$ Ph
I'	Carbone total	$3{,}08 \times 0{,}661$	$+3{,}85 \times 0{,}102$	$+0{,}6 \times 0{,}232$	$= 2{,}57$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}661$	$+5{,}1 \times 0{,}102$		$= 0{,}77$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}661$	$+0{,}3 \times 0{,}102$		$= 1{,}49$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}661$			$= 1{,}19$ Ph
J'	Carbone total	$3{,}08 \times 0{,}5$	$+3{,}85 \times 0{,}149$	$+0{,}6 \times 0{,}351$	$= 2{,}325$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}5$	$+5{,}1 \times 0{,}149$		$= 0{,}95$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}5$	$+0{,}3 \times 0{,}149$		$= 1{,}145$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}5$			$= 0{,}9$ Ph
K'	Carbone total	$3{,}08 \times 0{,}79$	$+3{,}85 \times 0{,}125$	$+0{,}6 \times 0{,}085$	$= 2{,}963$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}79$	$+5{,}1 \times 0{,}125$		$= 0{,}938$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}79$	$+0{,}3 \times 0{,}125$		$= 1{,}777$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}79$			$= 1{,}42$ Ph

L′	Carbone total	$3{,}08 \times 0{,}67 + 3{,}85 \times 0{,}197 + 0{,}6 \times 0{,}133$	$= 2{,}9$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}67 + 5{,}1 \times 0{,}197$	$= 1{,}265$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}67 + 0{,}3 \times 0{,}197$	$= 1{,}529$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}67$	$= 1{,}2$ Ph
M′	Carbone total	$3{,}8 \times 0{,}5 + 3{,}85 \times 0{,}302 + 0{,}6 \times 0{,}198$	$= 2{,}819$ C
	Manganèse	$0{,}38 \times 0{,}5 + 5{,}10 \times 0{,}302$	$= 1{,}73$ Mn
	Silicium	$2{,}2 \times 0{,}5 + 0{,}3 \times 0{,}302$	$= 1{,}19$ Si
	Phosphore	$1{,}8 \times 0{,}5$	$= 0{,}9$ Ph

Ainsi que nous l'avons fait pour les mélanges de fonte hématite n° III avec fonte lamelleuse et acier, représentons encore géographiquement ces nouveaux mélanges de fonte Esch n° II avec la même fonte lamelleuse et des chutes d'acier corroyé, en faisant entrer dans cette représentation les mélanges N′, O′, P′ et Q′ de fonte Esch n° II et d'acier, précédemment étudiés.

Nous n'entrerons pas dans dans les détails de construction de cette épure *(pl. V, fig. 1)*, puisque ce ne serait que répéter ce que nous avons déjà dit au sujet de la construction de l'épure analogue *(pl. II, fig. 1)* à laquelle il suffit de se reporter.

Transportant l'épure *pl. V, fig. 1*, sur la *fig. 2* et élevant, en chacun des 14 points représentant les mélanges essayés, des ordonnées de longueur proportionnelle aux teneurs en carbone, la surface passant par l'extrémité de ces ordonnées représentera la loi de variation des teneurs en carbone dans les mélanges de fonte Esch n° II, de fonte blanche lamelleuse et d'acier.

De même si, sur la même épure *(pl. V, fig. 2)* on porte sur les ordonnées des 14 points représentant les mélanges essayés, des longueurs proportionnelles aux teneurs en manganèse, la surface passant par l'extrémité de ces 14 ordonnées sera la loi de représentation topographique de la variation de teneur en manganèse dans ces mélanges.

La surface passant par l'extrémité de chacune des mêmes

ordonnées *(pl. V, fig. 2)* prises de longueur proportionnelle aux teneurs en silicium, sera la loi de variation des teneurs en silicium dans les mélanges de fonte Esch n° II avec-fonte lamelleuse et acier.

Enfin, la loi de variation des teneurs en phosphore, dans ces mélanges de fontes, serait aussi la surface passant par l'extrémité de chacune des mêmes ordonnées prises de longueur proportionnelle aux teneurs en phosphore de ces mélanges.

Pour représenter chacune de ces quatre lois de variation des éléments étrangers au fer dans ces mélanges de fontes, il suffit de déterminer leur intersection avec des plans horizontaux dont l'écartement corresponde, d'après l'échelle adoptée pour les ordonnées, aux teneurs en carbone, manganèse, silicium et phosphore: 1/2, 1, 1 1/2, 2, 2 1/2, 3, 3 1/2 et 4 0/0, et de tracer la projection de ces intersections sur le plan du triangle A'B'C' *(pl. V, fig. 2)*.

L'examen de cette épure nous fait reconnaître que ces lois de variation des teneurs sont presques planes, que les mélanges représentés géographiquement dans le voisinage A'B', du triangle A'B'C', sont ceux qui contiennent le plus de carbone, et que cette teneur en carbone diminue progressivement en s'éloignant de A'G' pour s'approcher du mélange Q' renfermant le minimum de carbone; que ce mélange Q' est aussi celui qui renferme le minimum de manganèse, et que cette dernière teneur s'élève progressivement à mesure que les mélanges approchent du point G' correspondant au mélange dont la teneur en manganèse est le plus élevée; enfin que le point A' correspond à la fonte contenant à la fois le plus de silicium et de phosphore, et que la teneur de ces éléments se perd progressivement à mesure que les mélanges s'éloignent du point A' pour se rapprocher de la ligne G'M'J'Q'.

Si l'on compare cette épure *(pl. V, fig. 2)* à l'épure

(pl. II, fig. 2), on trouve qu'en général les mélanges avec fonte hématite n° III diffèrent des mélanges avec fonte Esch n° II, par les teneurs en carbone et en manganèse qui sont notablement plus élevées dans les premiers que dans les derniers, et surtout par le phosphore existant en proportion relativement considérable dans les mélanges avec fonte Esch n° II.

L'épure *(pl. V, fig. 3)*, donnant par les courbes de niveau tracées dans le plan du triangle A'B'C' les projections des horizontales de la loi de variation de l'usure, dans les mélanges de fontes formés en proportions diverses de fonte Esch n° II, de fonte blanche lamelleuse et d'acier, a été obtenue, comme les précédentes épures, en faisant passer une surface par l'extrémité de chacune des 14 ordonnées élevées sur les points correspondant aux mélanges essayés, ces ordonnées ayant été prises de longueur proportionnelle aux volumes de métal enlevé dans les épreuves à la meule faites sur les 14 mélanges. Puis, comme cette surface représente la loi de variation de l'usure, nous avons déterminé, par construction graphique, ses courbes de niveau, en choisissant pour niveau supérieur le plan 10 correspondant à 4100 $^{m}/_{m^3}$ d'usure de la fonte Coltness n° I et divisant en 10 parties égales la distance qui les sépare du plan triangulaire A'B'C' pour faire passer par les points de division obtenus les plans 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 et 1.

Comme cette loi de variation de l'usure est une surface située en dessous du plan de niveau 8, le plan de niveau 7 est le premier qui vienne la rencontrer; l'intersection de cette surface avec le plan de niveau 6 déterminera, par la zone comprise entre le sommet A' et la courbe de niveau 6, la limite d'emploi de ces mélanges comme fontes mécaniques.

L'étendue si restreinte de cette zone montre combien les fontes phosphoreuses, si généralement employées à cause de leur bas prix, sont dures; combien il serait dangereux de les durcir encore davantage dans un appareil de fusion capable

de les affiner, c'est-à-dire capable de leur enlever du silicium et du carbone; et aussi combien l'on doit craindre de les associer dans leur fusion à des mélanges de fonte ou de fer qui les décarbureraient encore, ne fût-ce que faiblement.

Les mélanges E' et H', donnant de la fonte encore à peu près grise, seraient déjà beaucoup trop durs pour être acceptées pour le moulage de pièces ayant à être ajustées.

Pour trouver la loi de variation de la résistance à la traction de ces mélanges, reportons *(pl. VI, fig. 1)* l'épure géographique *(pl. V, fig. 1)* et élevons en chacun des 14 points, correspondant aux mélanges essayés, des ordonnées de longueur proportionnelle aux efforts de traction qui ont déterminé la rupture des barrettes d'essais. La surface passant par l'extrémité de chacune de ces ordonnées sera cette loi de variation que nous représenterons par ses courbes de niveau correspondant aux efforts de rupture 10, 12,5, 15, 17,5, 20 et $22^{kg}5$ par millimètre carré.

L'examen de ces courbes de niveau nous montre qu'il existe deux sommets $22^{kg}5$ correspondant au maximum de résistance à la rupture par traction: l'un, compris entre A' et H', tombe encore à peu près dans la zone de douceur supérieure au degré 6; mais l'autre sommet, dans le voisinage du point P', correspond à un mélange trop dur pour être utilisé. De plus, ces sommets ont trop peu de surface pour que l'on puisse, avec quelque certitude, obtenir la résistance à la traction à laquelle ils correspondent, au moyen de mélanges. De sorte que l'on ne peut guère compter que sur une résistance à la traction comprise entre 20 et $22^{kg}5$ par millimètre carré, à laquelle on puisse parvenir à l'aide de l'un de ces mélanges de fontes approprié et correspondant à peu près à 5 0/0 fonte lamelleuse, 10 0/0 acier et 85 0/0 fonte Esch n° II, ou à une composition approximative de

$3{,}08 \times 0{,}85 + 3{,}85 \times 0{,}05 + 0{,}6 \times 0{,}1 = 2{,}863$ 0/0 carbone,
$0{,}38 \times 0{,}85 + 5{,}1 \times 0{,}05 = 0{,}579$ 0/0 manganèse,

$2{,}20 \times 0{,}85 + 0{,}30 \times 0{,}05 \qquad = 1{,}8715$ 0/0 silicium,
$1{,}80 \times 0{,}85 \qquad = 1{,}52$ 0/0 phosphore.

L'épure *(pl. VI, fig. 2)* donne la loi de variation de la résistance au choc des mélanges de fonte Esch n° II avec fonte blanche lamelleuse et acier, par les courbes de niveau tracées dans la surface topographique de représentation de cette loi et déterminées, comme dans les lois précédentes, à l'aide des ordonnées de longueur proportionnelle aux résistances au choc, trouvées dans les épreuves des 14 fontes essayées et provenant de ces mélanges.

Ces lignes de niveau sont les projections sur le plan du triangle A'B'C' des intersections de la surface, passant par l'extrémité de chacune des ordonnées, avec les plans horizontaux correspondant aux hauteurs de chute $0^{m}20$, $0^{m}25$, $0^{m}30$, $0^{m}35$, $0^{m}375$ et $0^{m}40$ du boulet.

Elles montrent que, dans ces mélanges, la résistance maximum au choc est environ $0^{m}375$ et s'étend sur une zone assez large, mais dans la partie de la surface topographique située hors des limites du degré de douceur 6. Par conséquent, cette résistance maximum au choc ne peut être obtenue, dans ces mélanges, que sur des fontes trop dures pour être utilisées comme fontes mécaniques; tandis que le mélange intermédiaire entre H' et A' qui nous avait donné le maximum de résistance à la traction, et qui est situé à la limite de douceur admissible, ne présente que la résistance au choc $0^{m}25$, résistance très médiocre et inférieure même à celle de la fonte Esch n° II pure.

L'épure *(pl. VI, fig. 3)* est établie, comme les précédentes, en élevant sur les 14 points de l'épure géographique *(pl. V, fig. 1)* reportée *(pl. VI, fig. 3)*, des ordonnées de longueur proportionnelle aux résistances à la flexion trouvées dans les épreuves des 14 mélanges essayés, et, imaginant une surface passant par l'extrémité de chacune de ces ordonnées, ce qui donne la loi de variation des résistances à la flexion des

mélanges de fonte Esch n° II avec fonte blanche lamelleuse et acier; puis, déterminant pour les projeter sur le plan du triangle A'B'C', les intersections de cette surface topographique avec des plans horizontaux correspondant aux efforts 20, 25, 27,5, 30, 32,5 et 35kg de rupture par flexion.

D'après cette épure, le maximum 32kg5 de résistance à la flexion, dans ces mélanges, est donné par une fonte située entre H' et I', c'est-à-dire très éloignée de la limite de douceur admissible dans les fontes mécaniques; tandis que le mélange intermédiaire entre H' et A' qui, bien qu'étant à la limite de douceur, nous avait donné le maximum de résistance à la traction, n'offre plus qu'une résistance à la flexion de 25kg, ou plutôt une résistance comprise entre 20 et 25kg, c'est-à-dire à peine supérieure à celle de la fonte Esch n° II pure.

On pourrait étendre beaucoup plus les recherches sur ces mélanges de fonte Esch n° II avec fonte blanche lamelleuse manganésée et acier, en construisant les lois de variation de leur retrait, de leur tassement et de leur profondeur de trempe en coquille; mais cela serait sans intérêt pratique, puisque ces mélanges prennent très mal la trempe en coquille et, sauf les quelques mélanges situés dans le voisinage immédiat de A', sont la plupart sans utilité dans la construction mécanique.

Ce qui précède suffit pour faire reconnaître que la fonte Esch, comme toutes celles provenant de minerais aussi phosphoreux et qu'il serait si utile de pouvoir améliorer, ne se prête ni par appauvrissement en carbone, ni par enrichissement en manganèse, à aucune amélioration convenable de leurs résistances. La plus faible décarburation les rend sèches, dures, blanches, tassantes et caverneuses, tandis que malgré l'élévation de leur degré de carburation par la fonte lamelleuse, le manganèse qu'elle introduit en même temps blanchit ces fontes phosphoreuses, les rend lamelleuses et plus caverneuses encore.

Il n'en est pas de même pour la fonte d'hématite qui nous a servi dans les premiers mélanges, puisque nous avons trouvé que tout en obtenant une fonte de douceur suffisante pour être travaillée, on pouvait par un mélange approprié de cette fonte avec de la fonte blanche lamelleuse et de l'acier, faire passer ses résistances primitives,

De : 17kg1 par millimètre carré, à la traction, à environ 23kg et jusque 27kg,

De : 0m37, au choc, à environ 0m45 et jusque 0m50,

De : 19kg69 par millimètre carré, à la flexion, à environ 40kg;

Soit, en moyenne,

Élever de 50 0/0 sa résistance à la traction,
de 30 0/0 sa résistance au choc,
et de 100 0/0 sa résistance à la flexion (1);

et, en définitive, obtenir par ce mélange spécial des fontes tenaces présentant une résistance presque généralement deux fois plus grande que celle des fontes communes.

Bien des pièces de machines en fer forgé, produites à grands frais, pourraient être fabriquées beaucoup plus économiquement avec cette fonte tenace, surtout celles dont la forme ou les dimensions rendent le forgeage difficile ou pénible, tandis que la fonte ordinaire conduit à une très lourde construction, comme, par exemple, les balanciers, traverses, manivelles, pistons, engrenages, etc.

Pour la construction des pistons à vapeur, en particulier, la résistance élevée de la fonte tenace permettant d'arriver à des pièces légères, est d'une grande importance, parce que avec la grande rapidité de marche des machines construites actuellement, un piston lourd engendre, dans son mouvement

(1) Dans les fontes, la résistance à la flexion est donc celle que l'on peut élever le plus par des mélanges convenables; aussi, dans les expositions, souvent utilise-t-on cette propriété, en faisant reposer un barreau de fonte sur deux appuis et suspendant une forte charge au milieu, pour montrer la ténacité plus ou moins grande de la fonte exposée.

de va-et-vient rapide, des résistances aussi nuisibles au rendement du moteur qu'à la conservation du cylindre.

L'application de la fonte tenace se recommande tout particulièrement dans la construction des cylindres de presse hydraulique et permettrait, sans avoir à exagérer l'épaisseur de ces cylindres jusqu'au point où les cavités de tassement les rendent caverneux, d'atteindre des pressions bien plus élevées que celles auxquelles on s'arrête, même avec des fontes choisies, mais ne présentant pas une ténacité aussi considérable.

Enfin, ces fontes tenaces obtenues à l'aide de mélanges les amenant à leur limite maximum de résistance et par conséquent les rendant plus dures que celles devant être travaillées, seraient plus denses et plus réfractaires que les fontes ordinaires et conviendraient mieux que ces dernières, pour résister aux efforts destructeurs du feu, des sels et des acides. Aussi seraient-elles d'un emploi durable et avantageux dans les fabriques de produits chimiques pour vases et cornues, pour creusets à fondre le plomb, le zinc et d'autres métaux, pour creusets à tremper les limes, pour chaudières à concentrer les dissolutions salines, pour moufles d'émaillage, et dans les mines, pour corps de pompes et pistons.

Les applications de cette fonte tenace, trempée par sa coulée en coquille, ne sont guère moins étendues. Sans parler des pointes de cœur de croisements de voie, si répandues dans les chemins de fer de certains États, ni des roues de wagons de mines et de tramways, cette fonte trempée s'applique surtout à la fabrication des cylindres de laminoirs à tôles, des cylindres de satinage du papier, des cylindres broyeurs, des meules à écraser le sable, les cailloux, des mâchoires à briser le minerai, la castine, les pierres, des noix de moulins à houille, etc., de certaines étampes ou enclumes de marteaux-pilons, de matrices pour le forgeage à la presse hydraulique; aux boulets à percer les cuirasses ou blindages,

aux tambours ou poulies à empreintes pour chaînes, etc.; à toutes les pièces enfin dans lesquelles la surface est exposée à subir des déformations par glissement, sous d'énergiques efforts de compression.

Pour terminer, ajoutons que dans la fabrication des moulages en fonte tenace, les diverses résistances cherchées ne peuvent être obtenues d'une façon assurée, constante et régulière, que par l'emploi de mélanges de métaux convenables et déterminés par des épreuves aussi bien comme nature que comme proportion, et qu'il ne suffit pas de connaître les mélanges à employer pour obtenir avec ces fontes le maximum de ténacité; il faut encore maintenir à une composition constante les éléments entrant dans ces mélanges. Or, s'il est relativement facile de trouver du fer ou de l'acier (pourvu qu'ils ne soient pas oxydés) de composition assez uniforme pour n'avoir pas à craindre de variations par ce métal, vu la faible proportion de son emploi, il n'en est pas de même pour les fontes entrant en beaucoup plus large proportion dans ces mélanges, et qui peuvent être de composition si variable dans les éléments qu'ils renferment.

Si, dans la même coulée d'un haut fourneau, fréquemment on rencontre des différences dans la composition de la fonte produite, à plus forte raison peut-on en rencontrer dans deux coulées différentes faites à des époques éloignées, quoique les minerais fournissant ces fontes aient été extraits du même gisement; et l'on conçoit que des différences beaucoup plus sensibles encore doivent se rencontrer, quand la fonte employée provient d'usines ou de gisements différents.

Aussi, dans une fonderie qui achète ses fontes brutes, et même qui les fabrique, ne peut-on arriver à une production certaine et régulière de fontes tenaces, qu'en ayant un approvisionnement de fontes important. Cet approvisionnement devra être divisé en un assez grand nombre de lots : 10 à 5, au moins; et, que l'appareil de fusion employé soit le réverbère, pour

les grosses pièces, ou le cubilot, les charges devront être formées en prenant pour chacune une gueuse ou une demi-gueuse seulement de chaque lot, de façon à obtenir que chacune des charges représente une moyenne de composition de tout l'approvisionnement, ces fontes à résistance maxima ne pouvant être obtenues qu'en resserrant le plus possible les écarts de leur composition, pour demeurer toujours à la composition qui procure les résistances les plus élevées.

En opérant ainsi, on sera à peu près certain d'arriver à une composition régulière et uniforme des fontes produites, et cette composition moyenne durera aussi longtemps que l'approvisionnement. On peut prolonger indéfiniment cette marche en faisant en sorte que chaque nouvel arrivage de fonte, suivant l'importance de la fabrication, forme un ou deux lots que l'on introduit de la même manière dans les mélanges. De la sorte, les variations produites par ces nouvelles fontes n'entrant que pour 5 à 10 0/0, au plus, dans les mélanges précédemment déterminés ne peuvent les altérer sensiblement, quelle que soit la différence existant entre le lot de fonte nouvelle et les lots de fonte plus ancienne.

Cette façon de procéder, quoique paraissant puérile aux ouvriers chargés de la préparation des charges, est cependant essentielle à une bonne fabrication et ne dispense pas des essais à faire à la suite de chaque coulée, sur barreaux d'épreuve coulés avec ces fontes tenaces, afin de pouvoir remédier immédiatement, en modifiant les melanges, à tout défaut de résistance qui viendrait à se manifester.

Dans une fabrication soignée, toute pièce trempée ou non qui, quoique sans défaut de fonderie, ne présenterait qu'une résistance douteuse, devrait être impitoyablement cassée.

Le but de cette étude aura été atteint, si nous sommes parvenu à éveiller l'attention des constructeurs sur les fontes tenaces, la place qu'elles peuvent occuper dans bien des parties de machines que l'on fait en fer forgé, en acier et même

en cuivre, sur les ressources que ces fontes peuvent leur offrir dans la construction et, finalement, sur l'importance économique de ces fontes à cette époque de concurrence internationale à outrance. Nous voudrions également être arrivé à montrer aux fondeurs, comment ces fontes tenaces, trempées ou non, peuvent être obtenues, par quelle méthode les mélanges à employer doivent être étudiés; la nécessité de recourir à des fontes de bonne qualité et de rejeter les fontes phosphoreuses ne pouvant conduire à aucun bon résultat pratique.

IMPRIMERIE CENTRALE DES CHEMINS DE FER. — IMPRIMERIE CHAIX.
RUE BERGÈRE, 20, PARIS. — 17070-6.

Pl. 1.

ave ...istance à la flexion.

...te N° 2

...nce

Y

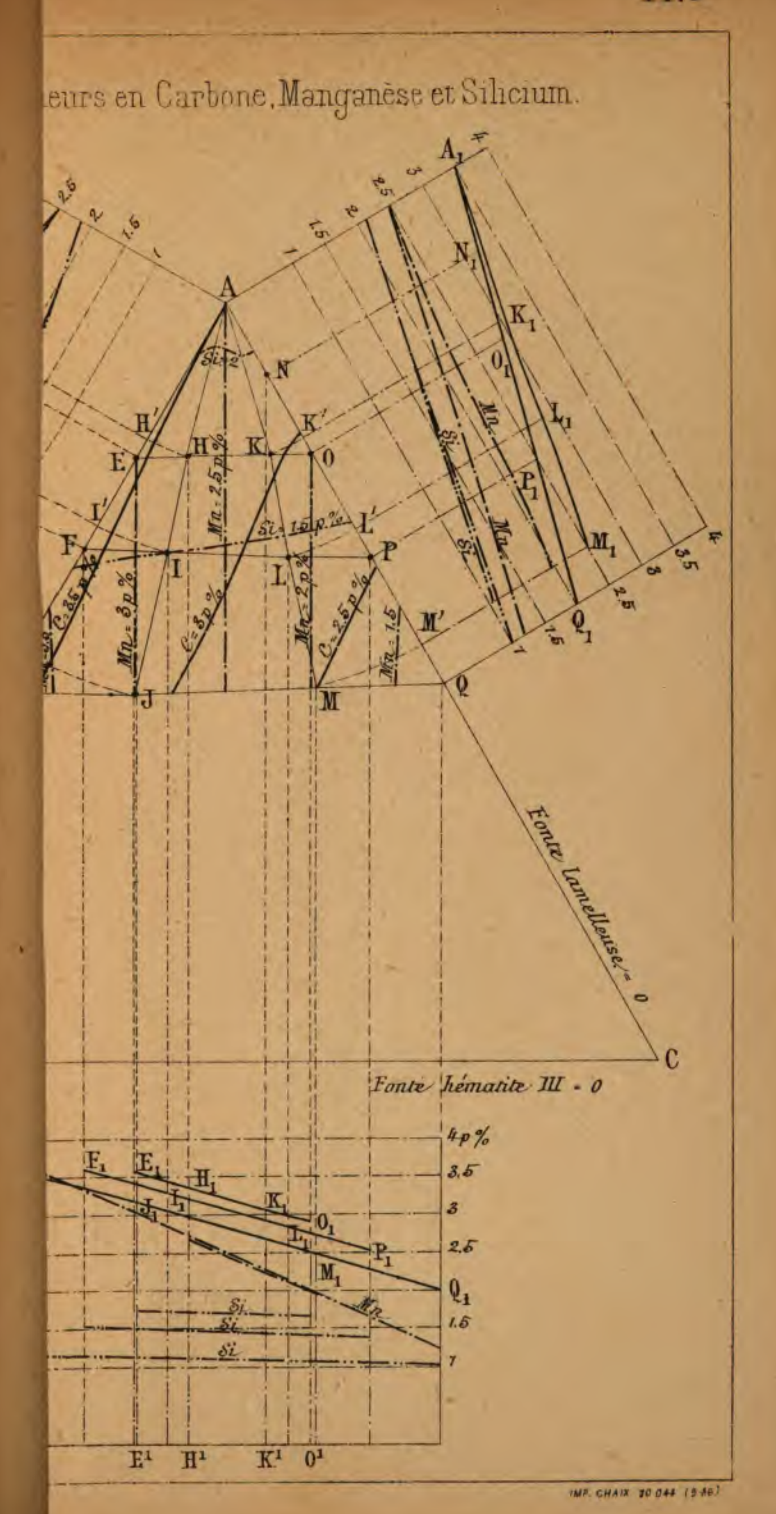
... douceur de la fonte produite.

... N° 6

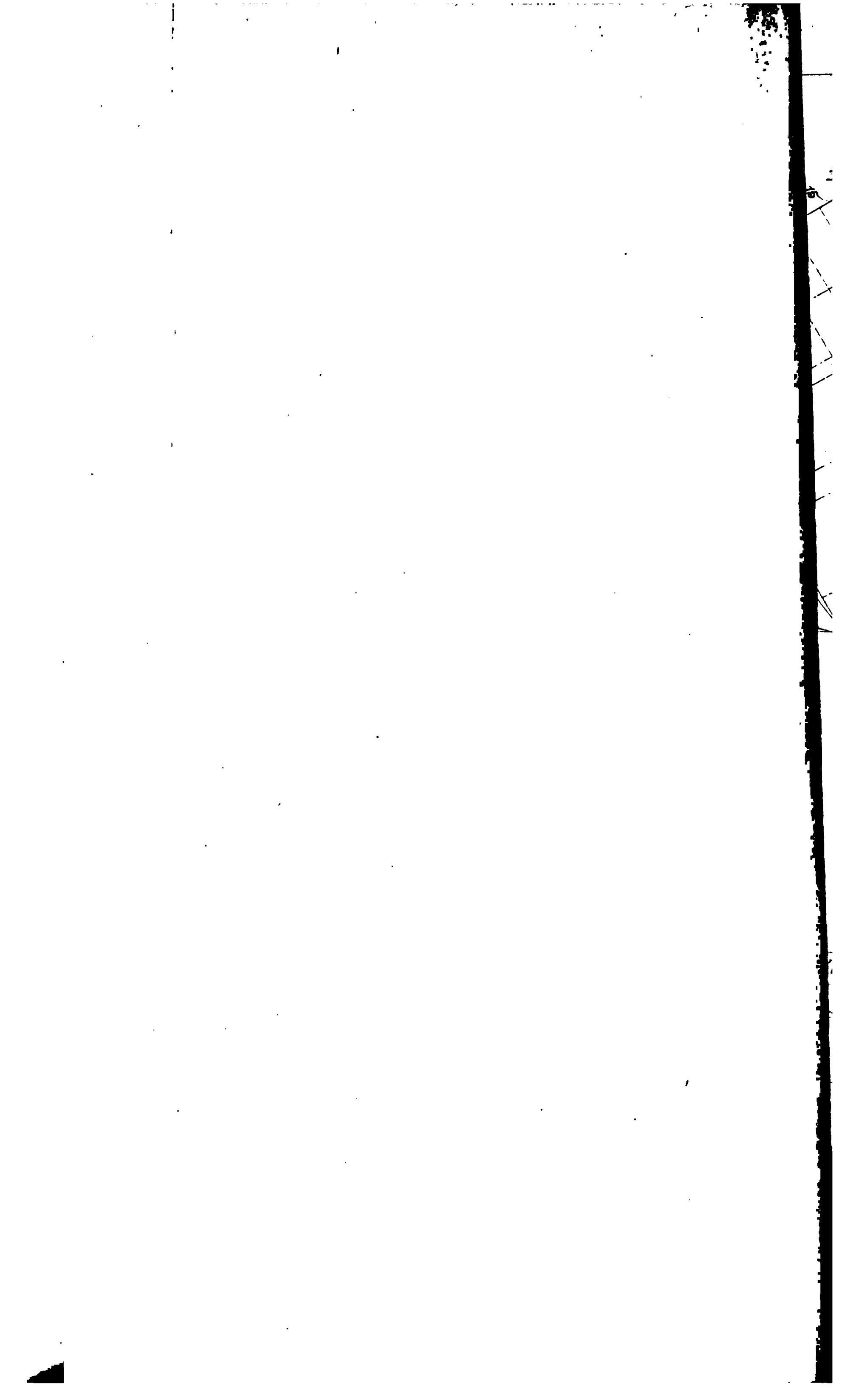
Q

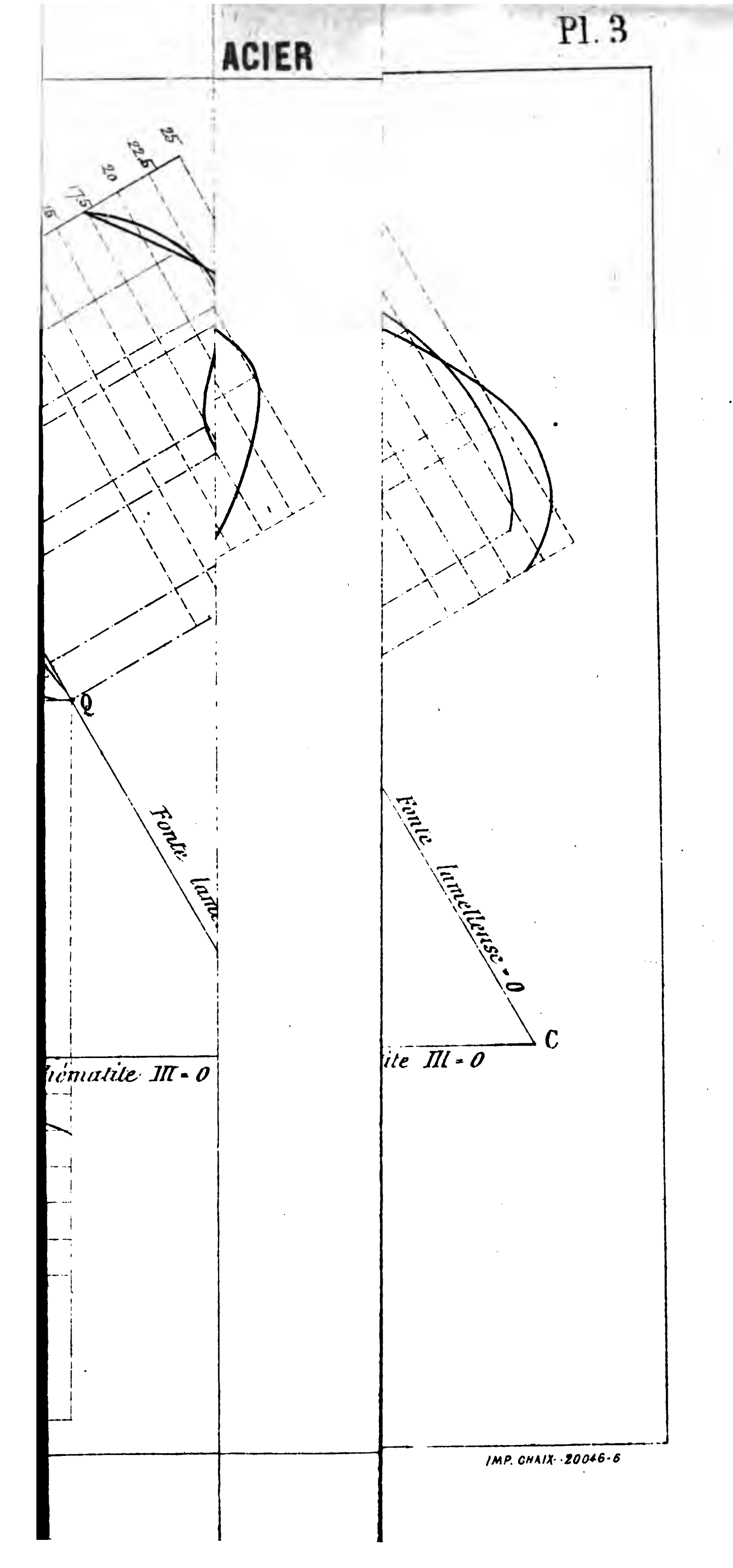
Y

IMP. CHAIX 20 042 (3-86)

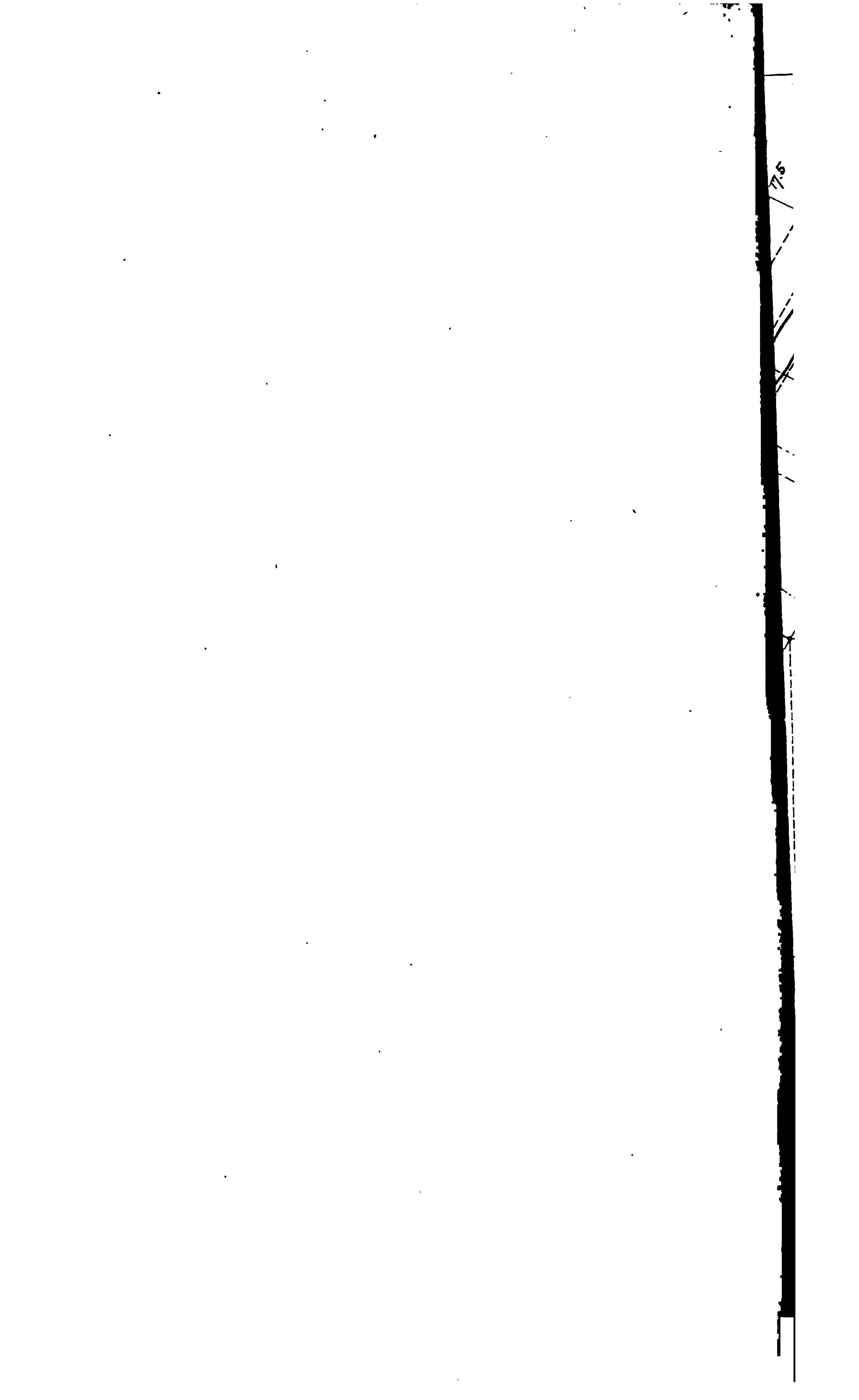


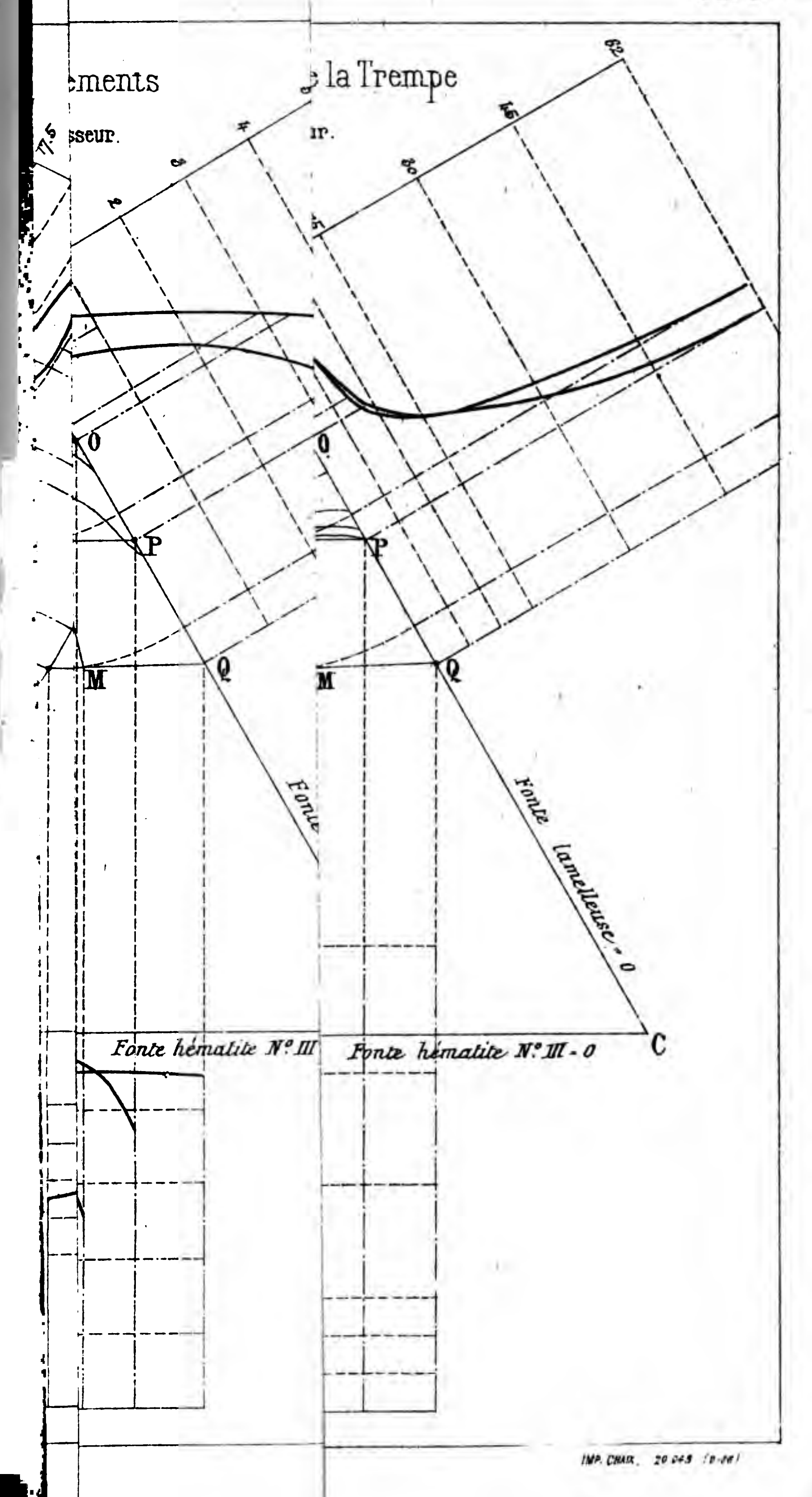
IMP. CHAIX 20044 (9-86)



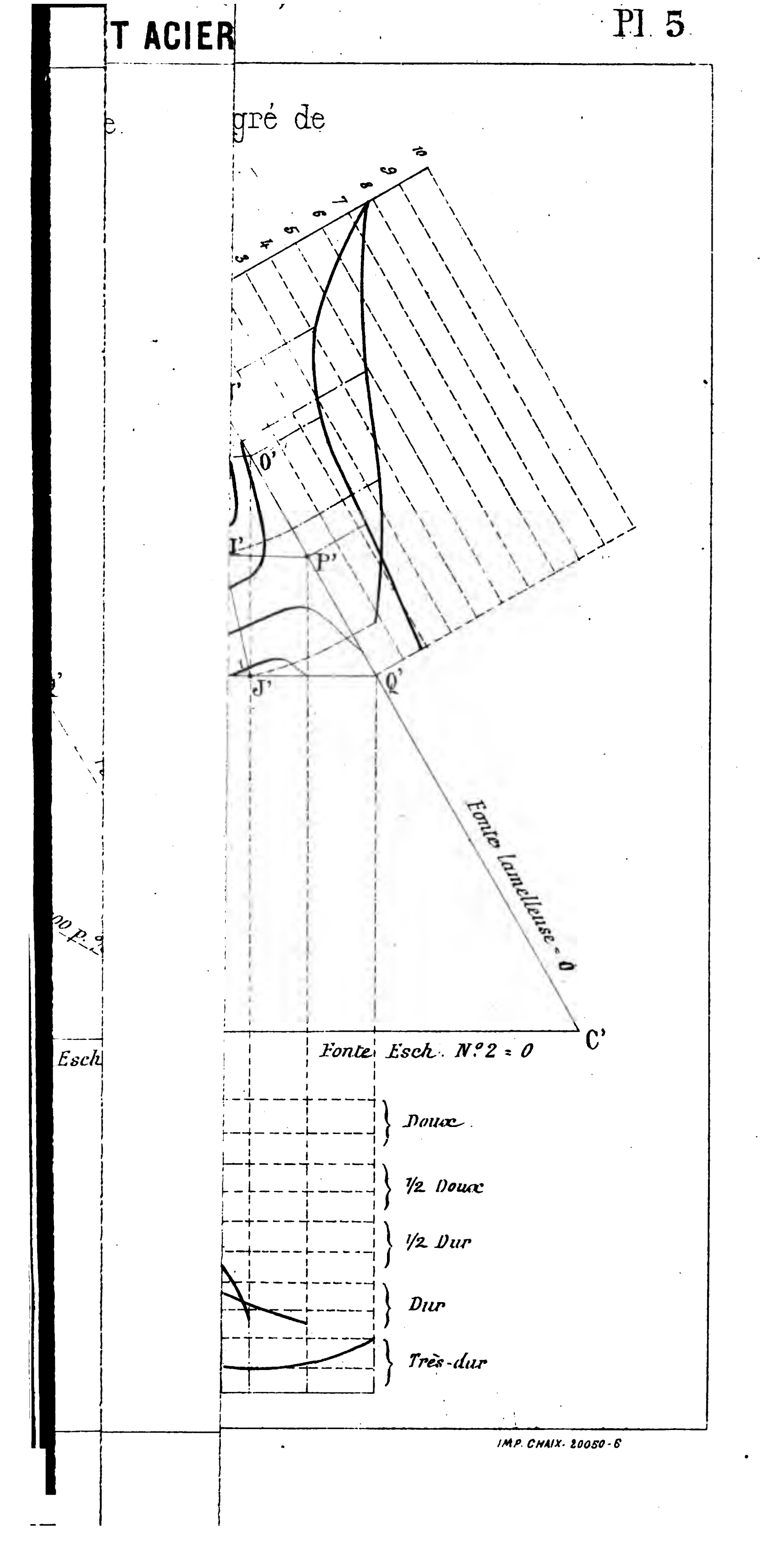


IMP. CHAIX - 20046-6

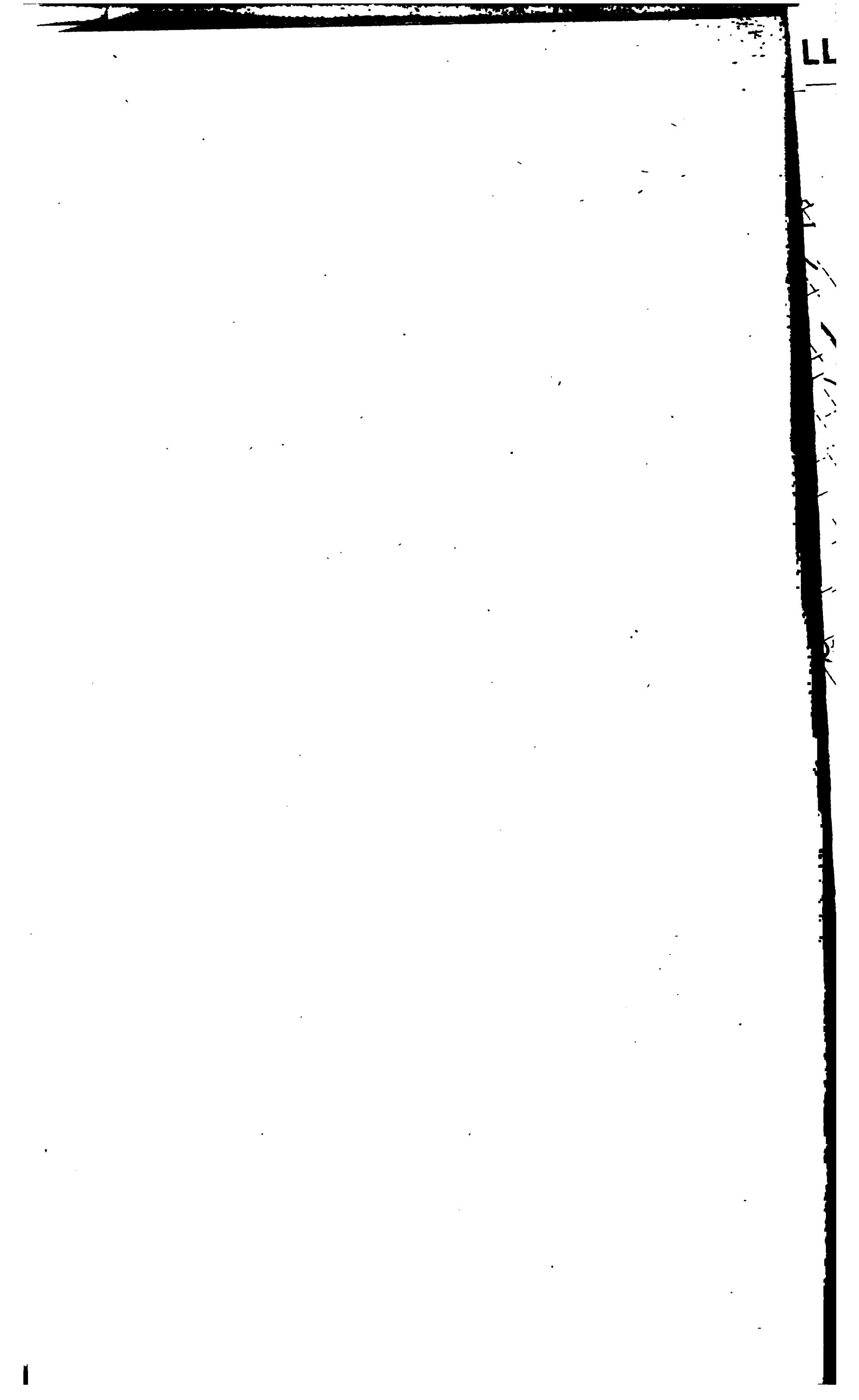

17.5



IMP. CHAIX. 20 043 (0-08)



IMP. CHAIX. 20050-6



Fonte lamelleuse - 0

N° II = 0

C'

Fonte lamelleuse - 0

...e Esch N° II = 0

C'

IMP. CHAIX - 20052-6 -

